

Desenvolvimento de um sistema de monitorização *low cost* de uma câmara frigorífica

Pedro José da Silva Carvalho Pereira de Sousa

Dissertação do MIEM

Orientadores:

Prof. Manuel Rodrigues Quintas
Prof. Paulo Augusto Ferreira de Abreu



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Opção de Automação

Junho de 2014

Resumo

Atualmente, as empresas e instituições de investigação estão cada vez mais dependentes de equipamentos tecnológicos para a realização da sua atividade diária, o que faz com que seja importante monitorizar constantemente o seu funcionamento. No caso das indústrias alimentar e farmacêutica, as câmaras frigoríficas podem ser vistas como fundamentais para a conservação dos produtos e/ou das amostras a analisar.

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de monitorização de baixo custo para câmaras frigoríficas que permita monitorizar a temperatura, a humidade relativa, o estado de abertura da porta de acesso e o consumo energético, possibilitando o registo e visualização de dados através de uma interface gráfica tátil.

O protótipo desenvolvido baseado no uso de microcontroladores e eletrónica customizada é constituído por três módulos:

O módulo HMI realiza a interface com o utilizador e é dotado de um ecrã tátil onde é possível visualizar os dados obtidos tanto de forma numérica como através de gráficos do tipo *strip chart*, visualizar os alarmes gerados pelo sistema e interagir com elementos de memória USB, tais como *pens*.

O módulo de sensores interno permite adquirir e comunicar os valores de temperatura, humidade relativa e estado de abertura da porta.

O módulo de sensor externo permite monitorizar a corrente elétrica consumida pelo sistema, comunicando através de uma ligação sem fios. Para este módulo foi desenvolvido um sensor de corrente elétrica, tendo sido feita a sua calibração.

O protótipo do sistema de monitorização desenvolvido foi instalado num frigorífico, tendo-se verificado a sua correta funcionalidade.

Duas características a destacar neste sistema são a possibilidade de funcionamento autónomo dos módulos desenvolvidos e a sua capacidade de fácil expansão.

Development of a low cost cold storage monitoring system

Abstract

Nowadays, companies and research institutions are dependent on technological equipment for their daily activity. This makes it important to constantly monitor their performance. For the food and pharmaceutical industries, cold storages can be seen as critical equipment, being responsible for the maintenance of products and product samples.

The main goal of this work is to develop a low cost cold storage monitoring system for temperature, relative humidity, the access door opening state and the electrical power consumption. The system must be able to record and visualize the data through a tactile graphical interface.

Three modules integrate the developed prototype, based on microcontrollers and dedicated electronic circuits:

The central module fulfils the role of an human-machine interface and includes a touchscreen where one may view the data numerically or through a strip chart, view the alarms that were generated by the system and interact with USB flash memories.

The internal sensor module acquires and communicates the measured temperature, relative humidity and door opening state values.

The external sensor module monitors the electrical current flowing through the system and communicates through a wireless connection. For this module, it was developed an electrical current sensor.

The prototype of the developed monitoring system was assembled on the laboratory's fridge and it was possible to verify its functionality.

Two important features of this device are the fact that the prototype modules can function autonomously and that the system can be easily expanded to include additional features.

There was also the need to develop an electrical current sensor and its calibration.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, o Prof. Manuel Quintas e o Prof. Paulo Abreu, pela disponibilidade, dedicação e confiança que sempre demonstraram e pelo conhecimento que me transmitiram ao longo deste semestre.

Aos investigadores do Laboratório de Instrumentação para Medição, nomeadamente ao Bruno Santos e ao Tiago Andrade, pela sua disponibilidade e ajuda.

Aos meus colegas Fernando Carneiro, Francisco Rua, Jorge Silva e Rafael Tavares, pelo companheirismo e por me ajudarem sempre que necessitei.

À minha família, especialmente aos meus pais, ao meu irmão João e à minha irmã Ana, por todo o seu apoio no meu dia-a-dia e por acreditarem sempre em mim.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Estrutura da dissertação	2
1.3	Sistemas de monitorização	3
2	Seleção e desenvolvimento de sensores.....	9
2.1	Temperatura.....	9
2.2	Humidade relativa	11
2.3	Consumo energético	12
2.4	Deteção de Abertura da Porta	18
2.5	Análise de Custo.....	19
2.6	Conclusão	23
3	Desenvolvimento de <i>Hardware</i>	25
3.1	Arquitetura.....	25
3.2	Módulo HMI	26
3.3	Módulo de sensores internos.....	41
3.4	Módulo de sensor externo	46
3.5	Conclusão	50
4	Desenvolvimento de <i>Software</i>	51
4.1	Comunicações	52
4.2	Estratégia de leitura dos sensores internos	72
4.3	Estratégia de cálculo do consumo energético.....	74
4.4	Interface Gráfica	78
4.5	Conclusão	86
5	Implementação Experimental.....	87
5.1	Módulo HMI.....	87
5.2	Módulo de Sensores Internos.....	90
5.3	Módulo de Sensor Externo	93
5.4	Teste e Caracterização dos sensores de corrente.....	95
5.5	Integração do sistema em frigorífico.....	100
5.6	Conclusão	103
6	Conclusões	105
7	Trabalhos Futuros	109

Referências.....	111
Anexos.....	119

Lista de figuras

Figura 2.1 – Sensor de humidade e temperatura DHT22 [36].....	12
Figura 2.2 – Diagrama de blocos representativo do funcionamento de um wattímetro, baseado no descrito em [38].....	12
Figura 2.3 – Bobine de <i>Rogowski</i> [44].....	14
Figura 2.4 - Transformador de corrente [44].....	15
Figura 2.5 - Resposta do elemento sensor a um campo magnético [44]	15
Figura 2.6 – Um sensor de efeito de Hall produz uma tensão de saída através do efeito de um campo magnético numa corrente elétrica [44].....	16
Figura 2.7 – Informações do frigorífico Zanussi TT150-4S	17
Figura 2.8 – Configuração utilizada para a construção de um sensor de corrente	18
Figura 2.9 – <i>Twido</i> TWDLCAA10DRF, um exemplo de PLC da <i>Schneider Electric</i> [55].....	20
Figura 2.10 – Exemplo de um módulo <i>Arduino</i> : Mega2560 Rev.3 [61]	21
Figura 2.11 – Placa de desenvolvimento Explorer 16 da <i>Microchip</i> [62].....	22
Figura 3.1 – Arquitetura do sistema de monitorização.....	26
Figura 3.2 - Arquitetura do módulo HMI.....	27
Figura 3.3 - Componentes Básicos de um Sistema Gráfico [69]	28
Figura 3.4 - Diferentes possibilidades de integração dos componentes gráficos [69].....	29
Figura 3.5 – Composição das duas camadas para formar um painel tátil resistivo, adaptado de [72]	30
Figura 3.6 – Medição da coordenada X num ecrã tátil resistivo [72].....	30
Figura 3.7 – Medição da coordenada Y num ecrã tátil resistivo [72].....	30
Figura 3.8 - Exemplo de um sinal enviado por USB 1.1 [73]	31
Figura 3.9 - Conector USB Tipo A e respetivo <i>pinout</i> [73].....	32
Figura 3.10 - Exemplo de interface USB <i>host</i> [79]	34
Figura 3.11 – Placa de circuito impresso central, com indicação dos principais componentes.....	36
Figura 3.12 – Fotografia da placa de circuito impresso central	37
Figura 3.13 – Placa de circuito impresso MiWi do módulo HMI com indicação dos principais componentes.....	38
Figura 3.14 - Fotografia da placa de circuito impresso MiWi do módulo HMI.....	38
Figura 3.15 - Fotografia da ligação entre a PCB central e a PCB MiWi	39
Figura 3.16 – Indicação das principais características da caixa desenhada para suporte do ecrã tátil	41
Figura 3.17 - Arquitetura do módulo de sensores internos	42
Figura 3.18 – Conector fêmea para termopar [82]	42

Figura 3.19 – Desenho final da placa de circuito impresso dos sensores internos com indicação dos principais componentes.....	44
Figura 3.20 – Fotografia dos componentes da placa de circuito impresso dos sensores internos	45
Figura 3.21 – Alojamento projetado para o módulo de sensores internos e identificação de características (vista frontal)	46
Figura 3.22 – Alojamento projetado para o módulo de sensores internos e identificação de características (vista alternativa)	46
Figura 3.23 - Caixa utilizada para a eletrónica de medição do consumo energético.....	47
Figura 3.24 – Arquitetura do módulo de sensor externo.....	47
Figura 3.25 - Divisor de tensão.....	48
Figura 3.26 – Saída do sensor de corrente ACS712-5A em função da corrente que o percorre [48].....	49
Figura 3.27 - Circuito impresso desenvolvido para a medição de corrente elétrica, com indicação dos principais componentes e interfaces	49
Figura 3.28 – Fotografia da placa de circuito impresso de sensor externo	50
Figura 4.1 - Comunicação <i>I-wire</i> com sensores DHT11 ou DHT22 [83].....	53
Figura 4.2 – Diagrama de blocos do procedimento utilizado para efetuar a leitura do sensor de humidade e temperatura DHT22	54
Figura 4.3 – Diagrama de blocos representativo do processo utilizado para a leitura de cada bit.....	55
Figura 4.4 – Modos de relógio disponíveis para SPI, em função dos <i>bits</i> CKP e CKE [79]	58
Figura 4.5 – Modos de amostragem disponíveis para SPI, em função do <i>bit</i> SMP [79]	58
Figura 4.6 – Diagrama da evolução temporal de uma comunicação SPI num PIC24F [79].....	59
Figura 4.7 – Procedimento de comunicação SPI.....	60
Figura 4.8 – Sincronização do mestre e do escravo para comunicação SPI.....	60
Figura 4.9 – Procedimento para envio e reconstrução de uma variável inteira	61
Figura 4.10 – Procedimento de envio de um <i>float</i> de quatro <i>bytes</i> por SPI utilizando um <i>union</i>	62
Figura 4.11 – Procedimento de receção de um <i>float</i> de quatro <i>bytes</i> por SPI utilizando um <i>union</i>	62
Figura 4.12 – Lógica de comunicação implementada no mestre do Módulo de sensores internos	64
Figura 4.13 – Lógica de comunicação implementada no Módulo de sensores internos	64
Figura 4.14 – Topologia de rede em estrela utilizada pelo protocolo MiWi™ P2P [87]	67

Figura 4.15 – Topologia de rede utilizada pelo protocolo MiWi™ [87].....	68
Figura 4.16 – Topologia de rede utilizada pelo protocolo MiWi™ PRO [87].....	69
Figura 4.17 – Diagrama de blocos do <i>stack</i> MiWi [88]	70
Figura 4.18 – Lógica de envio de informações por MiWi implementada no microcontrolador de interface com o sensor de corrente	71
Figura 4.19 – Lógica de receção de informações por MiWi implementada no microcontrolador MiWi do ecrã tátil.....	72
Figura 4.20 – Ciclo principal do microcontrolador de interface com os sensores internos.....	73
Figura 4.21 – Lógica de definição da variável de estado da abertura da porta..	74
Figura 4.22 – Lógica de amostragem do sensor de corrente.....	75
Figura 4.23 – Diagrama de blocos relativo à lógica de cálculo do valor RMS da corrente	77
Figura 4.24 – Diagrama de blocos representativo do método de cálculo da aproximação inteira da raiz quadrada [89].....	77
Figura 4.25 – Estrutura da biblioteca gráfica da <i>Microchip</i> [69]	79
Figura 4.26 – Estrutura de implementação das bibliotecas gráfica e USB, no contexto do programa principal do microcontrolador	80
Figura 4.27 – Representação da interface gráfica desenvolvida e das interligações entre os diferentes ecrãs	82
Figura 4.28 – Passos para desenho ou atualização dos gráficos	83
Figura 4.29 – Procedimento utilizado para alternar o estado de gravação USB.....	83
Figura 4.30 – Procedimento utilizado para a gravação de dados na memória USB.....	85
Figura 5.1 – Peças do alojamento para o módulo HMI impressas em PLA	88
Figura 5.2 - Protótipo do módulo HMI em processo de montagem	88
Figura 5.3 - Protótipo do módulo HMI	88
Figura 5.4 - Fotografia do ecrã “Estado Atual” do protótipo sistema de monitorização.	89
Figura 5.5 – Comunicação SPI: Sinal de relógio no canal 1 e <i>Chip Select</i> no canal 2	90
Figura 5.6 – Comunicação SPI: Sinal de relógio no canal 1 e sinal de saída do PIC24FJ256GB110 no canal 2, enviando um <i>byte</i> 0xEE	90
Figura 5.7 – Fotografia do módulo de sensores internos.....	91
Figura 5.8 - Primeiros <i>bits</i> enviados pelo DHT22.....	91
Figura 5.9 – Ruído à saída do MAX884 da <i>Maxim Integrated</i>	92
Figura 5.10 – Ruído à saída do DCR010503 da <i>Texas Instruments</i>	93
Figura 5.11 – Ligação dos diferentes componentes do módulo de sensor externo, antes da alteração de sensor de corrente.....	93
Figura 5.12 – Sensor de corrente desenvolvido, sem revestimento.....	94
Figura 5.13 – Sensor de corrente desenvolvido, após revestimento.....	94

Figura 5.14 – Protótipo do módulo de sensor externo, com indicação dos principais componentes	94
Figura 5.15 - Característica do sensor de corrente ACS712	95
Figura 5.16 – Onda de tensão à saída do elemento sensor, com as medições efetuadas pelo osciloscópio	96
Figura 5.17 – Principais componentes utilizados para a caracterização em CA do sensor de corrente	97
Figura 5.18 – Onda de tensão gerada pelo sensor de corrente	97
Figura 5.19 – Característica do sensor de corrente desenvolvido, em CA	98
Figura 5.20 – Verificação do sensor de corrente com um medidor de potência	99
Figura 5.21 – Evolução temporal da saída do conversor ADC associado ao sensor de corrente ao longo de cinco ciclos (100 ms).....	100
Figura 5.22 - Protótipo dos diferentes módulos do sistema de monitorização..	100
Figura 5.23 - Fotografias do sistema após implementação no frigorífico do LIM.....	101
Figura 5.24 – Excerto de um ficheiro <i>.csv</i> exportado pelo sistema durante a sua implementação no frigorífico do LIM.....	101
Figura 5.25 – Evolução dos parâmetros monitorizados, das 12 horas às 12:46. (A – Porta Aberta, F – Porta Fechada)	102
Figura 5.26 – Gráfico gerado pelo módulo HMI a partir das informações recebidas	103

Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Gamas de temperatura definidas na norma NP EN 12830, para utilização em armazenagem e unidades de distribuição [21]	6
Tabela 1.2 - Gamas de temperatura e humidade ideais para o armazenamento de diversos tipos de vegetais e frutas [27].	7
Tabela 2.1 - Alguns métodos de medição de temperatura comuns [31-33]	10
Tabela 2.2 - Alguns tipos de sensor de humidade [31]	11
Tabela 2.3 - Alguns tipos de detetores de proximidade [51].....	19
Tabela 2.4 - Análise aproximada do custo de uma solução baseada em PLC....	21
Tabela 2.5 - Análise aproximada do custo de uma solução baseada em <i>Arduino</i>	22
Tabela 2.6 - Análise aproximada do custo de uma solução baseada em placas de desenvolvimento da <i>Microchip</i>	22
Tabela 2.7 - Análise aproximada do custo de uma solução baseada em microcontroladores <i>Microchip</i> com eletrónica customizada	23
Tabela 3.1 - Pinout USB [73]	32
Tabela 4.1 - Correspondência entre os <i>bytes</i> recebidos e o valor da temperatura.....	53
Tabela 4.2 - Número de <i>bytes</i> para os tipos de dados mais comuns em C	61
Tabela 4.3 - Formatos de <i>float</i> da <i>Microchip</i> [85]	62
Tabela 4.4 - Explicitação da informação contida nos <i>bytes</i> enviados pelo MAX31855 [67]	65

Abreviaturas e Símbolos

ADC	<i>Analog-Digital Converter</i> – Conversor Analógico-Digital
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
CA (ou AC)	Corrente Alternada (<i>Alternating Current</i>)
CC (ou DC)	Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>)
FFC	<i>Flat Flexible Cable</i>
FPC	<i>Flexible Printed Circuit</i>
GDDX	<i>Graphics Display Designer X</i>
GOL	<i>Graphics Object Layer</i>
HACCP	<i>Hazard Analysis and Critical Control Point</i> - Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controlo
LIM	Laboratório de Instrumentação para Medição
LSB	<i>Least Significant Bit</i> – Bit menos significativo
MiWi	<i>Microchip Wireless</i> – Protocolo de comunicação sem fios
MSB	<i>Most Significant Bit</i> – Bit mais significativo
PAN	<i>Personal Area Network</i> – Rede de área pessoal
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> – Placa de Circuito Impresso
PDIP	<i>Plastic Dual In-Line</i>
PLA	Ácido Polilático
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> – Controlador Lógico Programável
PPS	<i>Peripheral Pin Select</i>
RGB	<i>Red Green Blue</i>

RMS	<i>Root-Mean-Square</i>
RP	<i>Remappable Peripheral</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> – Interface de Periféricos em Série
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USB OTG	<i>Universal Serial Bus On-The-Go</i>

1 Introdução

Atualmente, as empresas e instituições de investigação estão cada vez mais dependentes de equipamentos tecnológicos para a realização da sua atividade diária, o que faz com que seja importante dispor de sistemas de monitorização para muitos desses equipamentos.

No caso das indústrias alimentar e farmacêutica, as câmaras frigoríficas são vistas como fundamentais para a conservação dos produtos e/ou das amostras a analisar, pelo que existem no mercado diversos sistemas de monitorização direcionados para sistemas de refrigeração.

Tipicamente, os sistemas de monitorização de câmaras frigoríficas permitem visualizar e registar tanto a temperatura como a humidade. Estes sistemas podem recorrer a *hardware* proprietário ou ser baseados em autómatos programáveis.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de monitorização para câmaras frigoríficas que permita monitorizar:

- A temperatura;
- A humidade relativa;
- A abertura e fecho da porta de acesso;
- O consumo energético.

Para além disso, pretende-se que o sistema tenha a possibilidade de registo e visualização de dados junto do equipamento através de uma interface gráfica

tátil, com recurso a uma solução tecnológica de custo reduzido baseada em microcontroladores *Microchip* com eletrónica customizada.

Pretende-se também que possua uma arquitetura modular e expansível, para facilitar desenvolvimentos futuros do sistema e a integração de certos módulos noutras aplicações. Estes módulos deverão comunicar entre si através do protocolo de comunicação cablada SPI ou do protocolo de comunicação sem fios MiWi.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos mais introdução e conclusão.

No próximo capítulo, denominado “Requisitos para sistemas de monitorização de câmaras frigoríficas e seleção de sensores” apresentam-se as características mais frequentes de sistemas de monitorização comerciais, bem como a normalização e linhas orientadoras a que estão sujeitos. Para além disso, apresenta-se toda a definição de sensores a utilizar, seguida de uma análise de custo face a soluções alternativas como a utilização de PLCs, da plataforma de prototipagem *Arduino* ou de placas de desenvolvimento.

No terceiro capítulo, “Desenvolvimento de *Hardware*”, apresenta-se a arquitetura utilizada para o sistema de monitorização, bem como o processo de desenvolvimento do *hardware* e das caixas de suporte dos módulos.

No quarto capítulo, intitulado “Desenvolvimento de *Software*”, apresentam-se os protocolos de comunicação utilizados, a sua implementação e o desenvolvimento da interface gráfica.

No capítulo 5, sobre a “Implementação experimental”, são apresentados os protótipos desenvolvidos e os testes de implementação do sistema de monitorização desenvolvido, para além da caracterização dos dois sensores de corrente analisados.

Por fim, apresenta-se uma conclusão global do trabalho, bem como algumas propostas para trabalhos futuros, seguidos da bibliografia consultada.

1.3 Sistemas de monitorização

Nos sistemas de monitorização comerciais para a área alimentar e farmacêutica, é possível encontrar um leque alargado de funcionalidades:

- Medição da temperatura [1-18];
- Medição da corrente consumida [3, 5];
- Medição de pressão [9];
- Medição da humidade [1, 3, 7, 9, 10, 12, 15];
- Detecção do estado de abertura da porta [2, 5];
- Sistemas de *backup* baseados em dióxido de carbono (CO₂) ou azoto líquido [2];
- Geração de alarmes [1-6, 9, 11, 14, 16, 18, 19], com alerta através de SMS [14], *email* [4, 14], mensagem de voz [4] e/ou telefone [14];
- Exportação do histórico de dados [9];
- Geração de gráficos da evolução das variáveis medidas [1, 4, 6, 11];
- Detecção de falhas de energia [2, 3];
- Disponibilização dos dados através de um PC [1, 4, 9], utilizando um servidor *web* [1, 5, 9, 16];
- Ligação à *intranet* já existente [4];
- Comunicação sem fios [3-5, 12, 16, 18];
- Limitação do acesso aos dados [1];
- Capacidade de funcionamento sem necessidade de alimentação externa [9].

É de salientar que as gamas de temperatura e de humidade em que os sistemas de monitorização operam dependem da sua área de aplicação, pelo que se torna importante caracterizá-las. Desta forma, é necessário definir os requisitos existentes para os produtos que podem ser armazenados numa câmara frigorífica.

1.3.1 Normalização e linhas orientadoras

No que toca à indústria farmacêutica, o *Centers for Disease Control and Prevention* dos Estados Unidos da América definiu um conjunto de linhas orientadoras para o armazenamento e transporte de vacinas [19], no qual é recomendado que:

- A temperatura deverá ter um *setpoint* de 5°C, com uma variação máxima de 3°C, o que se traduz numa gama permissível entre 2°C e 8°C;

- A gama de monitorização deverá ser entre -20°C e 40°C , com uma resolução de 0.1°C ;
- A precisão mínima deverá ser de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$;
- A bateria do sistema de monitorização deverá durar no mínimo 6 meses;
- Deverá ter uma memória suficiente para 4000 leituras, que se traduzem em 39 dias à periodicidade mínima de uma leitura a cada quinze minutos;
- É obrigatório ter um transdutor externo destacável que se possa introduzir nos recipientes das vacinas.

Estes requisitos são semelhantes aos recomendados por J. Taylor [15] para o transporte e armazenamento de produtos médicos como vacinas, insulina e sangue, entre outros. O autor também aborda a possibilidade de o sistema de monitorização ser alimentado externamente, com uma bateria de *backup* com capacidade para, no mínimo, 48h de funcionamento. Segundo este autor, os efeitos de uma elevada humidade relativa nestes produtos serão insignificantes quando a proteção fornecida pelo acondicionamento primário for adequada, embora diminua a resistência do acondicionamento secundário de cartão. Por fim, o autor refere que a gama de temperatura indicada, embora a mais comum, não será universal, sendo importante verificar cada produto individualmente.

Por seu lado, a *Royal Pharmaceutical Society* da Grã-Bretanha, no seu guia de manipulação segura de medicamentos [13], refere que o armazenamento de produtos sensíveis ao calor, entre os quais vacinas, deverá ser feito em câmaras frigoríficas dedicadas, com monitorização e registo diários da temperatura, utilizando um termómetro calibrado ou outro dispositivo aprovado.

Como referido anteriormente, para além da indústria farmacêutica, outra indústria com grande utilização de sistemas de refrigeração é a indústria alimentar. Assim, relativamente a produtos alimentares, a norma *NP EN 12000 – Sistemas de gestão da segurança alimentar* [20] especifica os requisitos para um sistema de gestão da segurança alimentar, combinando os seguintes elementos chave:

- Comunicação interativa: “A comunicação ao longo da cadeia alimentar é essencial para assegurar que todos os perigos relevantes para a segurança alimentar são identificados e adequadamente controlados em cada elo da cadeia alimentar” [20];
 - A gestão do sistema;
 - Os princípios HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Points* - Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controlo): estes princípios são integrados nesta norma, uma vez que “a análise de perigos é o
-

elemento essencial de um sistema eficaz de gestão da segurança alimentar, dado que ajuda a organizar o conhecimento necessário para estabelecer uma combinação eficaz das medidas de controlo” [20];

- Os programas pré-requisito: “Atividades e condições básicas que são necessárias para manter um ambiente higiénico ao longo da cadeia alimentar” [20].

De um modo geral, esta norma recomenda a monitorização dos pontos críticos de controlo, ou seja, qualquer “etapa na qual pode ser aplicada uma medida de controlo [...] para prevenir ou eliminar um perigo para a segurança alimentar” [20]. Para além disso, também recomenda o estabelecimento e manutenção de registos “para proporcionar evidências da conformidade com os requisitos e da operação eficaz do sistema de gestão da segurança alimentar” [20].

Na etapa de armazenamento, o parâmetro mais importante a monitorizar é a temperatura, devido à sua grande influência no estado de conservação dos alimentos. Esta importância é visível também pelo facto de todos os sistemas de monitorização comerciais possuírem a capacidade de monitorizar este parâmetro.

Os sistemas de registo de temperatura são regulamentados pela norma NP EN 12830 [21], que define gamas de temperatura e de precisão que deverão ser cumpridas tanto para sistemas de registo em armazenamento como em transporte.

Para além disso, define apenas duas classes de exatidão:

- Classe 1: Permite um erro máximo de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, com uma resolução $\leq 0,5^{\circ}\text{C}$.
- Classe 2: Permite um erro máximo de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, com uma resolução $\leq 1^{\circ}\text{C}$.

Como se pode facilmente verificar, a Classe 1 corresponderá a sistemas de maior qualidade, pelo que, obviamente, se pretende atingir esta classificação.

A gama de temperatura que o transdutor terá de suportar também se encontra definida nesta norma e dependerá do ambiente climático em que se encontra. De um modo geral, deverá ter um “mínimo inferior a -15°C , um máximo superior a 25°C e uma amplitude superior a 50K ” [22]. Mais concretamente para o armazenamento de produtos alimentares, as gamas de temperatura exigidas encontram-se resumidas na Tabela 1.1.

A partir desta informação, é possível verificar que a exigência é semelhante para ambas as situações, excetuando, obviamente, as condições de funcionamento do elemento registador do sistema.

Para além disto, a norma define que deve ser possível identificar e consultar os gráficos e os dados registados, por um período de pelo menos um ano, com um intervalo de registo máximo de 30 minutos. Para além disso, o tempo máximo de resposta¹ do sensor para aplicações de armazenamento é de 20 minutos, com sensor externo, ou 60 minutos, com sensor interno.

Tabela 1.1 - Gamas de temperatura definidas na norma NP EN 12830, para utilização em armazenagem e unidades de distribuição [21]

Tipo de Ambiente Climático²	A	C
Tipo do Registador	Registador situado no exterior do recinto frigorífico com sensor externo	Registador situado no interior da caixa de refrigeração com sensor interno ou externo
Condições de funcionamento do registador	+5°C a +40°C	-30°C a +30°C
Condições limite do registador	0°C a +50°C	-40°C a +50°C
Condições de armazenagem do registador e de funcionamento do sensor	-20°C a +60°C	-40°C a +60°C

Esta norma não define condições de humidade, embora refira que o valor típico desta se situará no intervalo $60\% \pm 20\%$, um valor próximo dos considerados por [23] ($75\% \pm 5\%$) e por [24] ($70\% \pm 5\%$) para a realização das suas respetivas análises. No entanto, o mais importante passa por definir os valores extremos da gama de variação da humidade relativa e não o valor médio. A gama de variação possível é entre 0% e 100%, e, normalmente, o limite superior é o mais crítico para a definição do sensor tornando-se necessário verificar se a humidade relativa numa câmara frigorífica pode atingir esse limite. De acordo com as simulações realizadas por [25, 26], esse valor poderá ser atingido em certas situações.

¹ O tempo de resposta do sensor corresponde ao tempo necessário para que o valor registado alcance 90% da variação de temperatura definida nos procedimentos de ensaio da norma.

² O ambiente climático corresponde à combinação do tipo de utilização do aparelho (no caso da Tabela 1.1: Armazenagem e unidades de distribuição) e do tipo do registador/método utilizado.

Verifica-se também que temperaturas e humidades ideais de armazenamento variarão de acordo com o tipo de alimento [27-30], revelando-se a humidade especialmente importante para frutas e vegetais. Na Tabela 1.2 apresenta-se um resumo das gamas de humidade e temperatura recomendadas por [27] para o seu armazenamento³.

Tabela 1.2 – Gamas de temperatura e humidade ideais para o armazenamento de diversos tipos de vegetais e frutas [27].

Alimento		Temperatura	Humidade
Vegetais e frutas	Cenouras, brócolos	0 – 5°C	90 – 95%
	Pepino, beringela	7 – 10°C	80 – 90%
	Cebola, alho	1 – 13°C	50 – 60%
	Tomates	13 – 16°C	80 – 85%
	Abóbora	13 – 16°C	60 – 70%

³ Os valores recomendados para o armazenamento dos alimentos variam ligeiramente entre as diversas fontes consultadas.

2 Seleção e desenvolvimento de sensores

Neste capítulo, é feita a seleção dos sensores para o sistema de monitorização desenvolvido, referindo-se ainda o desenvolvimento de um sensor de corrente elétrica.

Após a escolha dos sensores, efetua-se uma análise do custo que a sua implementação terá num sistema de monitorização baseado em PLCs ou em microcontroladores. Dentro da abordagem baseada em microcontroladores, diferencia-se entre a utilização da plataforma de prototipagem *Arduino*, de placas de desenvolvimento *Microchip* e de microcontroladores *Microchip* com eletrónica customizada.

2.1 Temperatura

A medição de temperatura é aquela a que é dada uma maior relevância na bibliografia consultada, uma vez que é a que mais influencia a capacidade de conservação dos diversos produtos.

Tendo em conta que a câmara frigorífica que se pretende monitorizar se destina ao armazenamento de alimentos, as normas consultadas indicam que a gama útil do sensor de temperatura deverá ser, no limite, de -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$.

Em [31], a *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)* apresenta uma breve comparação entre os métodos de medição de temperatura mais frequentes no ramo da refrigeração. A partir desta, é possível verificar que existem diversas opções que garantem a gama de precisão pretendida, sendo as mais relevantes apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Alguns métodos de medição de temperatura comuns [31-33]

Método de Medição	Gama aproximada	Incerteza	Notas
RTD Platina	-259°C a 1000°C	0.0001 a 0.1°C	Elevado custo; Elevada precisão; Afetado pela radiação
Termístores	-55°C a 125°C	0.25°C	Baixa estabilidade e linearidade
Termopar Au/Pt	-50 a 1000°C	0.05 a 1°C	Elevado custo; Elevada precisão; Termómetro de referência para aplicações laboratoriais
Termopar K	≤1250°C	0.1 a 10°C	Geralmente recomendado para medição de elevadas temperaturas
Termopar T	≤350°C	0.1 a 3°C	Especialmente indicado para baixas temperaturas
Termopar E	≤900°C	0.1 a 7°C	Especialmente indicado para baixas temperaturas
Medição por Infravermelhos	Qualquer	Sem dados	Requer conhecimento da emissividade das superfícies

Através da análise desta informação, é possível verificar que os métodos menos dispendiosos capazes de fornecer a precisão e gama pretendidas serão os termopares K, T e E e os termístores. Para além destes, os RTD (*resistance temperature detector*) de platina, nomeadamente os Pt100, também podem ser interessantes.

Assim, optou-se por utilizar um termopar de tipo K uma vez que, para além de terem um custo reduzido, este já se encontrava disponível. Para além disso, a junta *quente* do termopar pode ser colocada no local que se considerar mais indicado para a medição sem necessidade de isolar o elemento sensor do ambiente envolvente. Esta vantagem permite, por exemplo, a monitorização da temperatura no interior de um recipiente específico no interior do frigorífico em vez da temperatura do ar no interior do frigorífico.

A utilização de termopares implica a compensação da junta fria, pelo que se recorreu a um circuito integrado da *Maxim Integrated*, o MAX31855K, para realizar essa função, bem como para traduzir o sinal analógico de baixa amplitude proveniente do termopar num sinal digital.

2.2 Humidade relativa

No que toca à medição da humidade relativa, verificou-se anteriormente a importância de o sensor de humidade possuir uma gama de medição que atinja o valor de 100% de humidade relativa. Para além disso, é importante garantir que o tipo de sensor suporte as temperaturas a que poderá ser sujeito no interior da câmara frigorífica, sendo indicado apontar para a mesma gama de temperatura que foi definida para a medição de temperatura. É de salientar que muitos sensores de humidade necessitam de compensação do efeito da temperatura.

Tal como para a medição de temperatura, a *ASHRAE*, em [31], apresenta uma breve comparação entre diversas abordagens possíveis. Na Tabela 2.2 apresentam-se alguns tipos de sensor de humidade que, para além de apresentarem a gama de funcionamento pretendida, não implicam custos de implementação demasiado elevados.

Tabela 2.2 – Alguns tipos de sensor de humidade [31]

Categoria do Sensor	Tipo de Sensor	Gama de Humidade Relativa	Gama de Temperatura	Precisão Aproximada
Elétrico	Filme polimérico	10% a 100%	Variável	$\pm 2\%$ a $\pm 3\%$
	Resina de troca iónica	10% a 100%	-40°C a 90°C	$\pm 5\%$

Tendo isto em consideração, efetuou-se uma análise dos produtos disponíveis no mercado, tendo em conta o seu custo e a sua gama de funcionamento, pelo que se escolheu o sensor DHT22 (também conhecido como RHT3 ou AM2302 e representado na Figura 2.1). Este sensor possui um módulo digital baseado num elemento sensor de filme polimérico [34, 35] e tem as vantagens adicionais de fornecer um sinal digital à sua saída e de compensar o efeito da temperatura nas medições.



Figura 2.1 – Sensor de humidade e temperatura DHT22 [36]

2.3 Consumo energético

A potência instantânea de um sistema é definida como o trabalho efetuado por unidade de tempo, ou seja, pelo esforço vezes o fluxo, podendo ser, num sistema elétrico, definida como:

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

Quando o circuito em questão é alimentado a corrente alterna, certos elementos, nomeadamente indutivos e capacitivos, podem inverter o fluxo da energia periodicamente [37]. A potência real, sendo a energia efetiva que é consumida pelo sistema, corresponde à fração de energia que flui apenas na direção da carga. Em contraponto, a potência reativa é a fração de energia que retorna à fonte em cada ciclo. Assim, quando se pretenda medir a energia realmente consumida num circuito AC ao longo de um determinado período de tempo, é necessário obter a potência real, integrando-a no tempo para obter a energia consumida.

Estas relações estão explicitadas no diagrama de blocos apresentado na Figura 2.2.

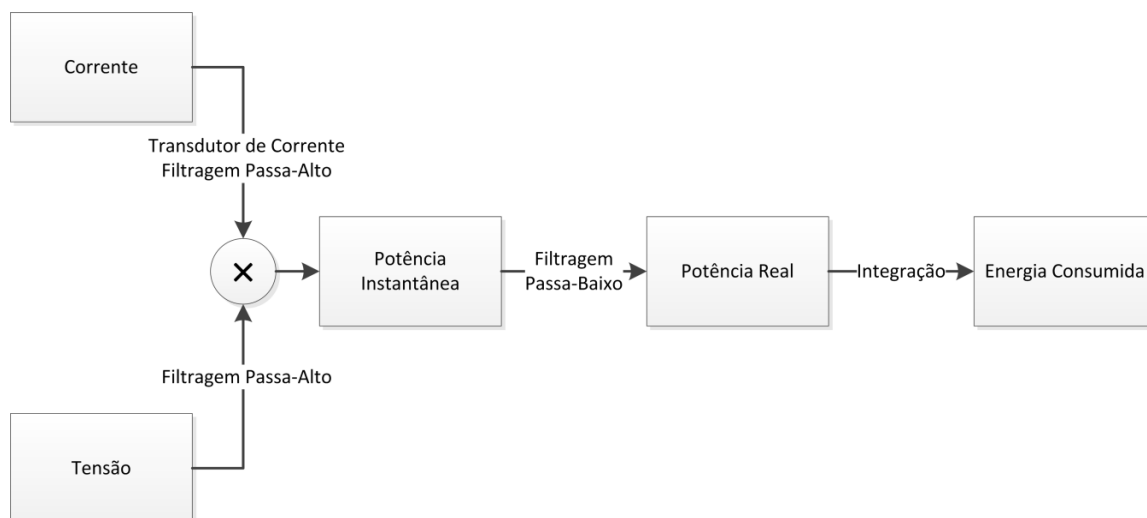


Figura 2.2 – Diagrama de blocos representativo do funcionamento de um wattímetro, baseado no descrito em [38].

Esta abordagem requer um transdutor de corrente, um transformador de tensão e um microprocessador capaz de processar os dados em questão e efetuar os cálculos. Os sinais de corrente e tensão são filtrados, de forma a remover algum *offset* DC, e multiplicados para obter a potência instantânea. De seguida, obtém-se o seu valor médio, a chamada Potência Real, através da filtragem passa-baixo. Por fim, integrando esse valor no tempo, é possível obter a energia consumida pelo sistema.

Este método tem a vantagem de ser válido para qualquer tipo de evolução da tensão e da corrente e para qualquer fator de potência.

No entanto, caso se pretenda apenas um valor aproximado da potência, é possível, em certas situações, considerar o fator de potência aproximadamente constante e calcular a potência com base nos valores RMS (*Root-Mean-Square*) da tensão e da corrente, multiplicados pelo fator de potência (*PF*):

$$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot PF \quad (2)$$

O fator de potência é definido como a razão entre a potência real ou potência ativa (P) e a potência aparente (S). No caso de uma onda sinusoidal, verifica-se a relação $S^2 = P^2 + Q^2$, em que Q é a potência reativa [39]. Definindo φ como o ângulo de fase entre a onda de corrente e a de tensão, é possível provar que o fator de potência corresponde ao cosseno desse ângulo.

Uma vez que uma câmara frigorífica se encontra normalmente a funcionar em regime permanente e que a informação de consumo pretendida é meramente indicativa, esta última solução foi utilizada como primeira abordagem ao problema.

Para além disto, verificou-se que a *Microchip* começou recentemente a comercializar um circuito integrado para medição energética, o MCP39F501. Para além de disponibilizar diretamente o valor de potência ativa, reativa e aparente, ainda permite obter o fator de potência, a frequência da linha, a corrente RMS e a tensão RMS, com comunicação UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) [40]. Este integrado realiza a medição da corrente através de uma resistência de precisão na ordem dos mΩ, colocada externamente. No entanto, uma vez que este produto ainda é muito recente, o tempo de espera necessário para a obtenção de um destes integrados tornou a sua utilização inviável, pelo que se optou por utilizar a alternativa já referida.

2.3.1 Corrente elétrica

Assim, é necessário utilizar um transdutor de corrente elétrica, que se pretende que tolere as correntes consumidas e que tenha um atravancamento reduzido, uma vez que, normalmente, o espaço disponível para a montagem deste elemento sensor junto da alimentação da câmara frigorífica é reduzido.

Alguns dos tipos de sensores usualmente utilizados para o fim pretendido são [41-44]:

- Queda de tensão através de uma resistência de valor reduzido e bem conhecido;
- Bobine de *Rogowski*;
- Transformador de Corrente;
- Sensor de efeito de Hall.

A primeira opção, embora teoricamente mais simples, requer uma resistência de precisão na ordem dos $m\Omega$ e capaz de suportar as correntes envolvidas. Estes requisitos devem-se à necessidade de evitar perdas energéticas excessivas e à necessidade de evitar um aquecimento excessivo do componente. Verificou-se, no entanto, que uma resistência apropriada tem um preço consideravelmente elevado. É de salientar que, mesmo assim, este é o método mais frequente na indústria, sendo inclusivamente o utilizado com o circuito integrado da *Microchip* anteriormente referido.

Por seu lado, a bobine de *Rogowski*, apresentada na Figura 2.3, como gera uma diferença de tensão, E , proporcional à variação da corrente, $\frac{dI}{dt}$, não é capaz de traduzir a componente contínua da corrente. A principal vantagem deste sistema é o facto de não ser utilizado qualquer material magnético que sature, o que permite que a saída continue linear mesmo para grandes correntes [44].

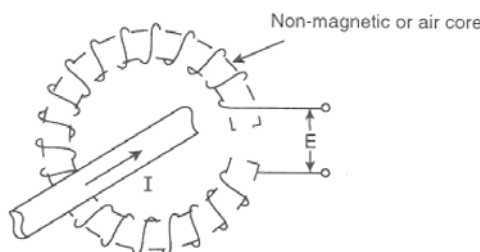


Figura 2.3 – Bobine de *Rogowski* [44]

Uma extensão das bobines de Rogowski são os transformadores de corrente. Estes são constituídos por um núcleo de material magnético que, tal como

representado na Figura 2.4, possuem uma terminação com uma baixa impedância, tornando a tensão induzida desprezável e, assim, a saída diretamente proporcional à corrente.

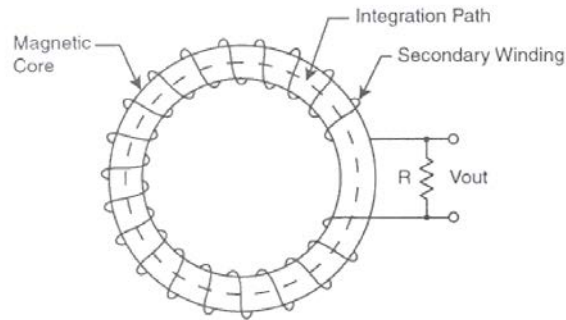


Figura 2.4 - Transformador de corrente [44]

Os sensores de efeito de Hall são tipicamente de tamanho reduzido, de baixo custo, compatíveis com corrente contínua e corrente alternada (até 20 a 30 kHz) e possuem uma resposta linear a um campo magnético, representada na Figura 2.5, e um isolamento inerente [44].

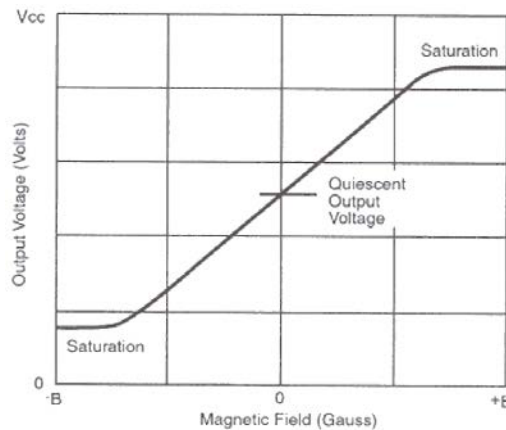


Figura 2.5 - Resposta do elemento sensor a um campo magnético [44]

Por outro lado, apresentam uma sensibilidade relativamente baixa, uma linearidade limitada, um *offset* à corrente nula e precisam de uma fonte própria de energia. O seu princípio de funcionamento está representado na Figura 2.6: a deflexão da corrente que flui pelo elemento sensor, I , devida ao campo magnético gerado pela corrente a medir induz uma diferença de tensão entre as duas superfícies do elemento sensor [44].

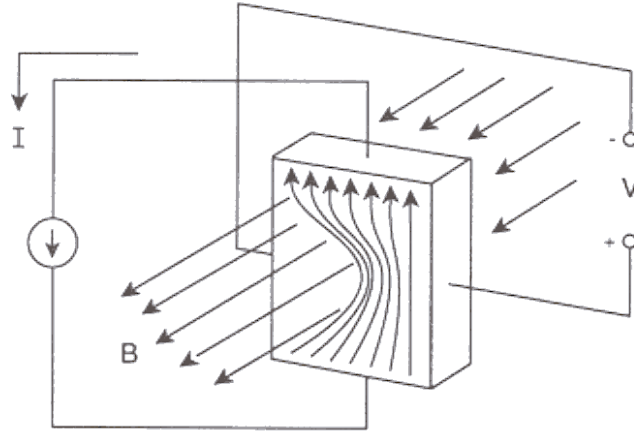


Figura 2.6 – Um sensor de efeito de Hall produz uma tensão de saída através do efeito de um campo magnético numa corrente elétrica [44]

Tendo isto em conta, optou-se inicialmente por um sensor de efeito de Hall, devido à sua linearidade, ao seu isolamento e, principalmente, ao seu custo reduzido.

Nos sensores deste tipo existem vários modelos disponíveis com níveis de saturação distintos, o que permite a escolha de um compatível com a gama de medição necessária. É interessante salientar que, quanto maior a gama disponível, menor será a resolução obtida.

Assim, para ser possível efetuar uma escolha bem ponderada, procedeu-se a uma análise das correntes que deverão estar envolvidas.

Como o sistema de monitorização deverá ser aplicado à câmara frigorífica existente no Laboratório de Instrumentação para Medição (LIM), um modelo da Zanussi, analisou-se a gama de frigoríficos de uma porta desta empresa, tendo-se concluído que a potência de um frigorífico deste género ronda os 100W [45].

Tendo em conta que a alimentação elétrica em Portugal é caracterizada por uma tensão RMS de 230 V é possível obter uma estimativa para a corrente a medir, considerando o caso limite de fator de potência unitário.

$$I_{RMS} \approx \frac{100}{230} = 0.44 \text{ A} \quad (3)$$

Para obter uma aproximação para o outro caso limite do fator de potência, consultaram-se os escalões de faturação definidos nas Novas Regras de Faturação da Energia Reativa [46]. Nestas, as referências ao fator de potência são tipicamente efetuadas através da tangente do ângulo de fase ($\tan \varphi$) [46, 47], sendo o pior escalão a partir de $\tan \varphi \geq 0.5 \Rightarrow \cos \varphi \leq 0.89$. Considerando um fator de potência de metade do escalão: $\cos \varphi = 0.45$, vem:

$$I_{RMS} \approx \frac{100}{230 \cdot 0.45} = 0.97A \quad (4)$$

Tendo em conta que, para uma onda sinusoidal, $I_{RMS} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$, sendo I_{\max} a amplitude da onda sinusoidal, o sensor deverá ter capacidade para medir correntes entre -1.38 e 1.38 A.

A adequação desta gama de corrente que o sensor deverá possuir foi confirmada pelos resultados obtidos nas medições efetuadas um dispositivo comercial de medição de potência elétrica, um *Paget Trading 9149*, que indicaram uma potência de 91 W ao ligar e um fator de potência de 0.49. Também se verifica pelos dados do fabricante do frigorífico, apresentado na Figura 2.7, que referem um valor de corrente RMS de 0.7 A.


Model	ZRG314SW	ZANUSSI	Prod.No.	933012152-03	Ser.No.	04120169
Type	TT150-4S					
Refrigerator - freezer						
Gross volume	146 l	Storage vol. of refr.	122 l			
Freezer compartment	18 l	Refrigerant	R 600a	34 g		
Compressor	230 V	~	50 Hz	0,7 A		
Freezing capacity	2 kg/24 h	Class	SN/N/ST			
Max. pressure ratio Ls/Hs 1,5/4,0 MPa						
						

Figura 2.7 – Informações do frigorífico Zanussi TT150-4S

A partir desta análise e efetuada uma pesquisa pelas soluções comerciais disponíveis no mercado, uma possível solução passa pelo uso de um sensor de corrente da *Allegro MicroSystems*, o circuito integrado ACS712 [48]. Esta empresa disponibiliza versões deste circuito integrado para utilização com correntes máximas de ± 5 A, ± 20 A e ± 30 A, o que permitia a fácil adaptação do sistema a sistemas com maior necessidade de corrente. De entre estes modelos, verifica-se que o modelo para ± 5 A é o mais apropriado, uma vez que, como tem uma gama mais apertada, apresenta uma melhor resolução.

Em [49], a *Allegro MicroSystems* refere que a resolução que se pode obter com este sensor é limitada pelo seu nível de ruído, sendo possível atingir resoluções na ordem dos 100 mA. Desta forma, procedeu-se à análise deste sensor, exposta no Capítulo 5.4.1, e verificou-se que não é o mais indicado para a aplicação prevista, devido à grande variação do sinal do sensor devida ao ruído.

Assim, foi desenvolvido um sensor de corrente especificamente para o sistema. A arquitetura do sensor desenvolvido, apresentada na Figura 2.8, utiliza um núcleo de ferrite com um enrolamento no qual circula a corrente a medir. Esta corrente gera um campo magnético que é medido recorrendo a um sensor de efeito de Hall. Este sensor é colocado no entreferro do núcleo. Com este método obtém-se um sinal de tensão proporcional à corrente que circula nesse enrolamento, sendo a sua sensibilidade e resolução principalmente dependentes do número de voltas do enrolamento. A sua caracterização é apresentada no Capítulo 5.4.2.

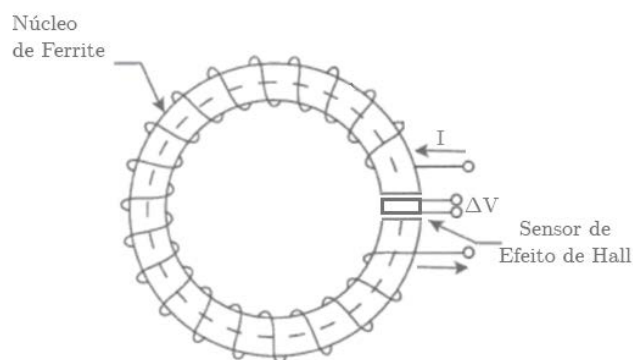


Figura 2.8 – Configuração utilizada para a construção de um sensor de corrente

É de salientar que o número de espiras foi selecionado para permitir a medição de 0 a 2.25 A_{RMS}. O custo de fabrico deste sensor foi muito reduzido, tendo sido reutilizadas uma bobine e respetivo núcleo de uma fonte de alimentação avariada.

2.4 Deteção de Abertura da Porta

O requisito de detetar e monitorizar o estado de abertura da porta da câmara frigorífica permite analisar comportamentos e verificar o efeito de uma porta aberta nos restantes parâmetros monitorizados. Para implementar esta funcionalidade, a escolha de um detetor de proximidade a montar na porta foi efetuada entre as várias opções apresentadas na Tabela 2.3.

Das possíveis soluções, quer o detetor de efeito de Hall, quer o detetor ótico, cumprem os requisitos necessários.

Da análise das soluções comerciais disponíveis, o sensor de efeito de Hall é aquela que tem uma melhor relação custo-funcionalidade, pelo que a escolha recaiu sob o A1302 [50], da *Allegro MicroSystems*.

Tabela 2.3 – Alguns tipos de detetores de proximidade [51]

	Material detetável	Outras Informações
Indutivo por correntes de Foucault	Material condutor	Deteção traduz-se numa variação de indutância
Detetor capacitivo	Material condutor	Deteção traduz-se numa variação de capacitância
Efeito de Hall	Material magnético	Deteção traduz-se numa variação de tensão
Contacto de <i>Reed</i>	Material magnético	Tem desgaste mecânico devido à comutação do contacto
Detetores óticos	Qualquer ou Materiais refletores	É possível detetar qualquer objeto, se através da interrupção de um feixe luminoso, ou apenas objetos refletores, se através de reflexão

É de salientar que o sensor de Hall, ao disponibilizar na sua saída um sinal analógico, pode vir a ser utilizado para não só detetar como também medir o ângulo de abertura da porta.

2.5 Análise de Custo

Tendo em conta que se pretende uma solução *low cost*, realizou-se uma análise de custo a duas soluções possíveis para implementar um sistema de monitorização para câmara frigorífica, uma baseada em PLCs e outra em microcontroladores. Qualquer destas soluções tecnológicas deve providenciar:

- Um módulo de ecrã tátil resistivo de 3.5'' e resolução de 320×240 pixéis;
- Uma interface com termopar tipo K;
- Pelo menos duas entradas analógicas, para a interface com os sensores de efeito de Hall;
- Interface com um sensor de humidade.

Para esta análise, e para efeitos de simplificação, considera-se que é possível realizar tudo apenas com um PLC/microcontrolador e que os custos da eletrónica necessária para a integração dos diferentes componentes são reduzidos, embora sejam manifestamente maiores caso se recorra a eletrónica customizada.

As conversões monetárias foram efetuadas tendo em conta o seu valor a 8 de Março de 2014 [52, 53]: $1\text{€}=0.82982\text{£}=1.38770\text{\$}$, não tendo sido considerado IVA, quando não incluído no preço, preços de transporte nem o preço dos sensores de efeito de Hall nem do termopar de tipo K, uma vez que estes seriam incluídos em qualquer uma das soluções. Para além disso, considerou-se sempre o preço relativo à quantidade mínima de venda para qualquer dos produtos.

2.5.1 PLC

A norma IEC 61131-1 [54] define os PLCs (*Programmable Logic Controllers* - Controladores Lógicos Programáveis) como sistemas digitais eletrónicos, desenvolvidos para uso num ambiente industrial, programável pelo utilizador e de fácil integração num sistema de controlo industrial. Na Figura 2.9 apresenta-se um exemplo de PLC, um *Twido* da *Schneider Electric*.



Figura 2.9 – *Twido TWDLCAA10DRF*, um exemplo de PLC da *Schneider Electric* [55]

As grandes vantagens destes sistemas passam pela sua robustez, pelas suas funcionalidades de segurança, e pela facilidade de programação e integração num sistema de controlo existente. Por outro lado, verifica-se que os componentes são caros e que as possibilidades de programação são limitadas ao permitido pelos fabricantes. Outra desvantagem é a incompatibilidade existente entre produtos de diferentes fabricantes, embora se tenha vindo a verificar nos últimos tempos um esforço de compatibilização entre estes. Desta forma, seguindo os requisitos já indicados e restringindo a procura a produtos da *Schneider Electric* ou produtos compatíveis, foi possível chegar aos valores apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Análise aproximada do custo de uma solução baseada em PLC

Componente	Fonte	Preço	Preço (€)
Interface Homem-Máquina (HMI) Schneider XBTGT1105	[56]	£315.58	€380.30
PLC Schneider Twido TWDLCAA10DRF	[55]	\$208.37	€150.15
Módulo para Termopar Schneider TM2ALM3LT	[57]	\$400.96	€288.94
Módulo de entradas analógicas Schneider TM2AMI2HT	[58]	\$319.24	€230.05
Sensor de humidade Vaisala HMP110	[59, 60]	\$355.00	€255.82
Total			€1305.26

Verifica-se, assim, que esta solução teria um custo de base de aproximadamente 1300€.

2.5.2 Microcontroladores

Para uma solução baseada em microcontroladores foram consideradas várias opções:

- Módulos *Arduino*;
- Placas de desenvolvimento *Microchip*;
- Microcontroladores *Microchip* com eletrónica customizada.

Os módulos *Arduino*, como o Mega2560 representado na Figura 2.10, já possuem grande parte das ligações principais efetuadas e são compatíveis com módulos de expansão existentes no mercado para as mais diversas funcionalidades.



Figura 2.10 – Exemplo de um módulo *Arduino*: Mega2560 Rev.3 [61]

As placas de desenvolvimento da *Microchip* seguem uma abordagem semelhante, nomeadamente no modelo Explorer 16 apresentado na Figura 2.11.

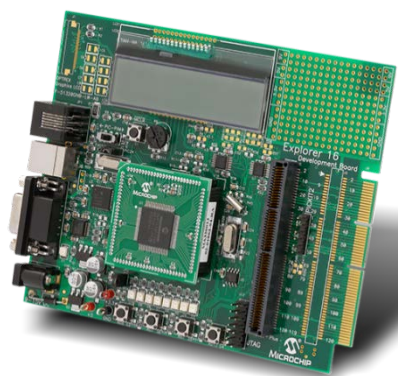


Figura 2.11 – Placa de desenvolvimento Explorer 16 da *Microchip* [62]

Ambas as soluções apresentam custos da mesma ordem de grandeza, uma vez que permitem um tempo de desenvolvimento mais curto, reduzindo as necessidades de desenvolvimento da eletrónica e permitindo a utilização direta de vários *software* já existente. Na Tabela 2.5 e na Tabela 2.6 apresentam-se os custos associados a cada uma destas soluções. Verifica-se que os custos são próximos, tendo a solução *Arduino* um preço base de aproximadamente 120€ e a solução *Microchip* 150€

Tabela 2.5 - Análise aproximada do custo de uma solução baseada em *Arduino*

Componente	Fonte	Preço	Preço (€)
Arduino Mega2560 Rev3	[61]	€39.00	€39.00
Módulo Ecrã Tátil arLCD	[63]	\$89.00	€64.14
Módulo MAX31855K	[64]	\$14.95	€10.77
Sensor DHT22	[36]	£3.27	€3.94
Total			€117.85

Tabela 2.6 - Análise aproximada do custo de uma solução baseada em placas de desenvolvimento da *Microchip*

Componente	Fonte	Preço	Preço (€)
PIC24FJ256GB110 Plug-In-Module	[65]	€18.19	€18.19
Placa de Desenvolvimento Explorer 16	[62]	€94.15	€94.15
Ecrã Tátil Microtips MTF-TQ35SP811-AV	[66]	\$45.74	€32.96
Circuito Integrado MAX31855K	[67]	\$4.50	€3.24
Sensor DHT22	[36]	£3.27	€3.94
Total			€152.48

A utilização de eletrónica customizada permite reduzir custos, como se pode verificar pela Tabela 2.7, embora aumente o tempo de desenvolvimento necessário.

Tabela 2.7 - Análise aproximada do custo de uma solução baseada em microcontroladores *Microchip* com eletrónica customizada

Componente	Fonte	Preço	Preço (€)
Microcontrolador PIC24FJ256GB110	[68]	\$6.57	€4.73
Ecrã Tátil Microtips MTF-TQ35SP811-AV	[66]	\$45.74	€32.96
Circuito Integrado MAX31855K	[67]	\$4.50	€3.24
Sensor DHT22	[36]	£3.27	€3.94
Total			€44.87

A partir dos dados apresentados, é possível concluir que a solução de menor custo passa pela utilização de uma solução baseada em microcontroladores *Microchip* com eletrónica customizada. O custo base desta solução ronda os 50€.

É de notar que esta análise de custo apenas considerou alguns aspetos relativos a *hardware* eletrónico, não sendo contabilizados custos de desenvolvimento de *software*, de placas de circuito impresso, de equipamento e de cablagem.

2.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os requisitos que o sistema de monitorização deve possuir em termos do tipo de sensores e suas características para a aplicação em causa.

Foram ainda selecionados os sensores a utilizar e apresentado o desenvolvimento de um sensor de corrente, necessário para a implementação da monitorização do consumo energético.

No anexo A apresenta-se uma lista dos sensores utilizados e as suas características principais.

3 Desenvolvimento de *Hardware*

No presente capítulo apresenta-se a arquitetura desenvolvida para o sistema de monitorização, sendo referidos os principais componentes utilizados e a forma como estes se interligam.

Posteriormente é descrito, para cada um dos módulos que constituem o sistema, tanto o desenvolvimento dos circuitos eletrónicos associados como o desenvolvimento das caixas de alojamento respetivos.

Para além disto, são referidos os protocolos de comunicação mais relevantes para a implementação da comunicação com o ecrã tátil.

3.1 Arquitetura

A arquitetura desenvolvida é baseada em microcontroladores *Microchip*, tendo sido pensada de forma a ser modular, expansível e capaz de ser utilizada com outros sistemas. A partir da Figura 3.1, na qual se apresenta a arquitetura implementada bem como as ligações entre os diferentes componentes utilizados, é possível identificar a existência de três módulos:

- Módulo HMI: concentra toda a informação gerada no sistema, apresentando-a ao utilizador através de uma interface gráfica tátil; inclui dois microcontroladores, um que realiza a interface com o ecrã tátil e com o armazenamento USB e gere a comunicação com o módulo de sensores internos, e outro que gere a comunicação sem fios com o módulo de sensor externo; é alimentado a partir de um transformador externo de 9V CC.

- Módulo de sensores internos: adquire a informação dos sensores de temperatura, humidade relativa e abertura da porta e comunica-a ao módulo HMI; inclui um único microcontrolador e é alimentado a partir da ligação cablada ao módulo HMI.
- Módulo de sensor externo: adquire a informação do sensor de corrente e processa-a de forma a obter o valor de corrente RMS, comunicando sem fios com o módulo HMI pelo protocolo MiWi; alimenta-se diretamente a partir da tomada elétrica à qual se encontra ligado.

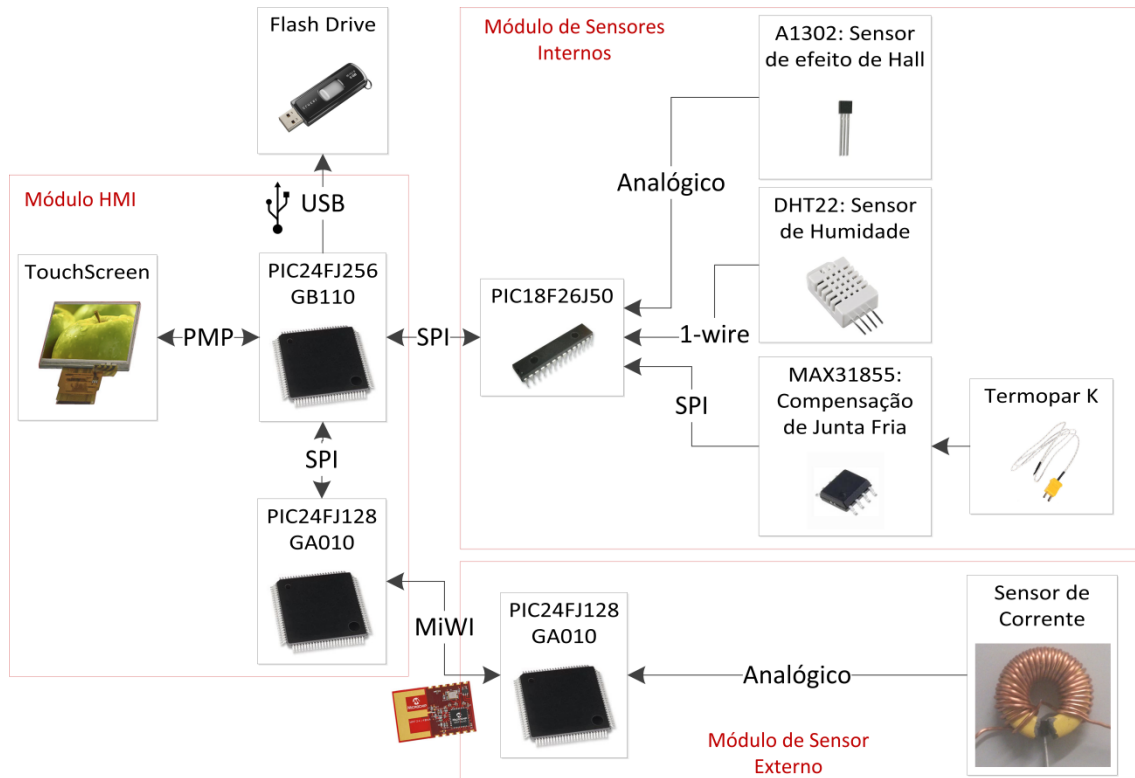


Figura 3.1 – Arquitetura do sistema de monitorização

Também é possível verificar que a arquitetura utilizada inclui tanto ligações cabladas como ligações sem fios, sendo implementados vários protocolos de comunicação como 1-wire, SPI, MiWi e USB, para além de comunicações em paralelo através do módulo PMP (*Parallel Master Port*). É de salientar que a interface entre dois dos sensores utilizados e o respetivo microcontrolador é feita através de sinais analógicos de tensão.

3.2 Módulo HMI

A interface homem-máquina (HMI – *Human Machine Interface*) é implementada com recurso a um ecrã tátil. Uma vez que se pretende um

sistema de baixo custo, verifica-se que as soluções existentes no Laboratório de Instrumentação para Medição, baseadas em placas de desenvolvimento da *Microchip*, não são as mais indicadas para o sistema, pelo que foi necessário desenvolver uma Placa de Circuito Impresso (PCB - *Printed Circuit Board*) para realizar a interface entre o microcontrolador e o ecrã tátil, seguindo a arquitetura apresentada na Figura 3.2.

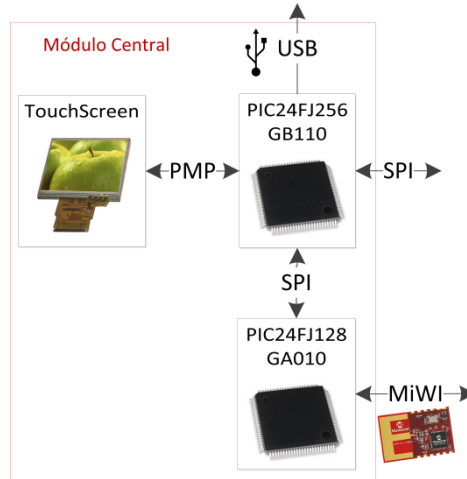


Figura 3.2 - Arquitetura do módulo HMI

3.2.1 Comunicações

3.2.1.1 Interface com ecrã tátil

A interface de um microcontrolador com o ecrã tátil pode ser efetuada de diversas formas, dependendo da distribuição dos componentes gráficos, representados na Figura 3.3, pelos respetivos módulos. Estes módulos principais são:

- O microcontrolador;
- O *frame buffer*, a memória na qual se guarda cada *frame* a apresentar no ecrã;
- O controlador gráfico (*display controller*), responsável pela conversão da informação recebida do microcontrolador num estímulo ao ecrã que produza uma imagem;
- O ecrã.

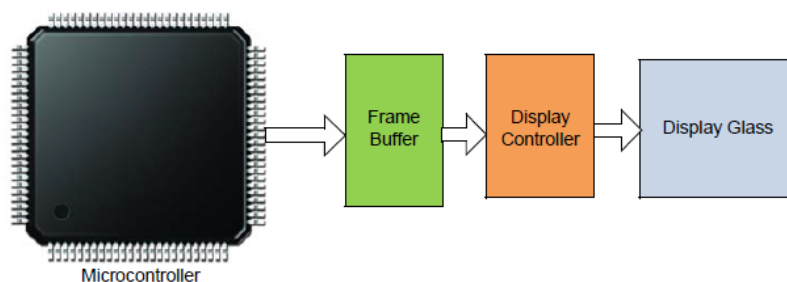


Figura 3.3 - Componentes Básicos de um Sistema Gráfico [69]

A integração destes componentes pode ser feita recorrendo a dois dispositivos, como nas alternativas A e C da Figura 3.4, ou recorrendo a três dispositivos, como nas alternativas B e D da mesma figura. Assim, na alternativa A há um módulo de display (*display module*) indivisível que inclui os componentes dedicados do sistema, sendo controlado por um microcontrolador, através de comunicações série ou paralelo. Na alternativa B há, entre o microcontrolador e o ecrã, um módulo de controlador gráfico (*graphic controller chip*) separado que comunica com o ecrã através de RGB (*Red Green Blue*) e com o microcontrolador através de comunicações série ou paralelo. As alternativas C e D implicam a atribuição de algumas das funções de controlo do ecrã ao microcontrolador, exigindo microcontroladores de famílias especializadas, tais como os PIC24FxxxDAxxx. A alternativa C concentra a totalidade dos módulos no microcontrolador enquanto a alternativa D inclui uma SRAM externa para o armazenamento de cada *frame*.

Assim, existem dois tipos principais de comunicações que podem ser utilizadas entre o microcontrolador e o ecrã: comunicações Paralelo/Série ou comunicações RGB.

Quando se utiliza um controlador gráfico externo ao microcontrolador, é frequente que a biblioteca da *Microchip* já inclua os *drivers* apropriados. No entanto, quando tal não acontece, será sempre possível alterar um *driver* existente. Estas comunicações são frequentemente baseadas em módulos semelhantes ao módulo PMP (*Parallel Master Port*), um módulo de Entrada/Saída de 8-bits que foi desenvolvido especialmente para comunicar com uma grande gama de dispositivo paralelos, desde LCDs a periféricos de comunicações e que se encontra disponível em diversos microcontroladores.

Quando se utiliza um controlador gráfico interno, este é sempre suportado pelas ferramentas disponibilizadas pelo fabricante para programação gráfica do microcontrolador respetivo.

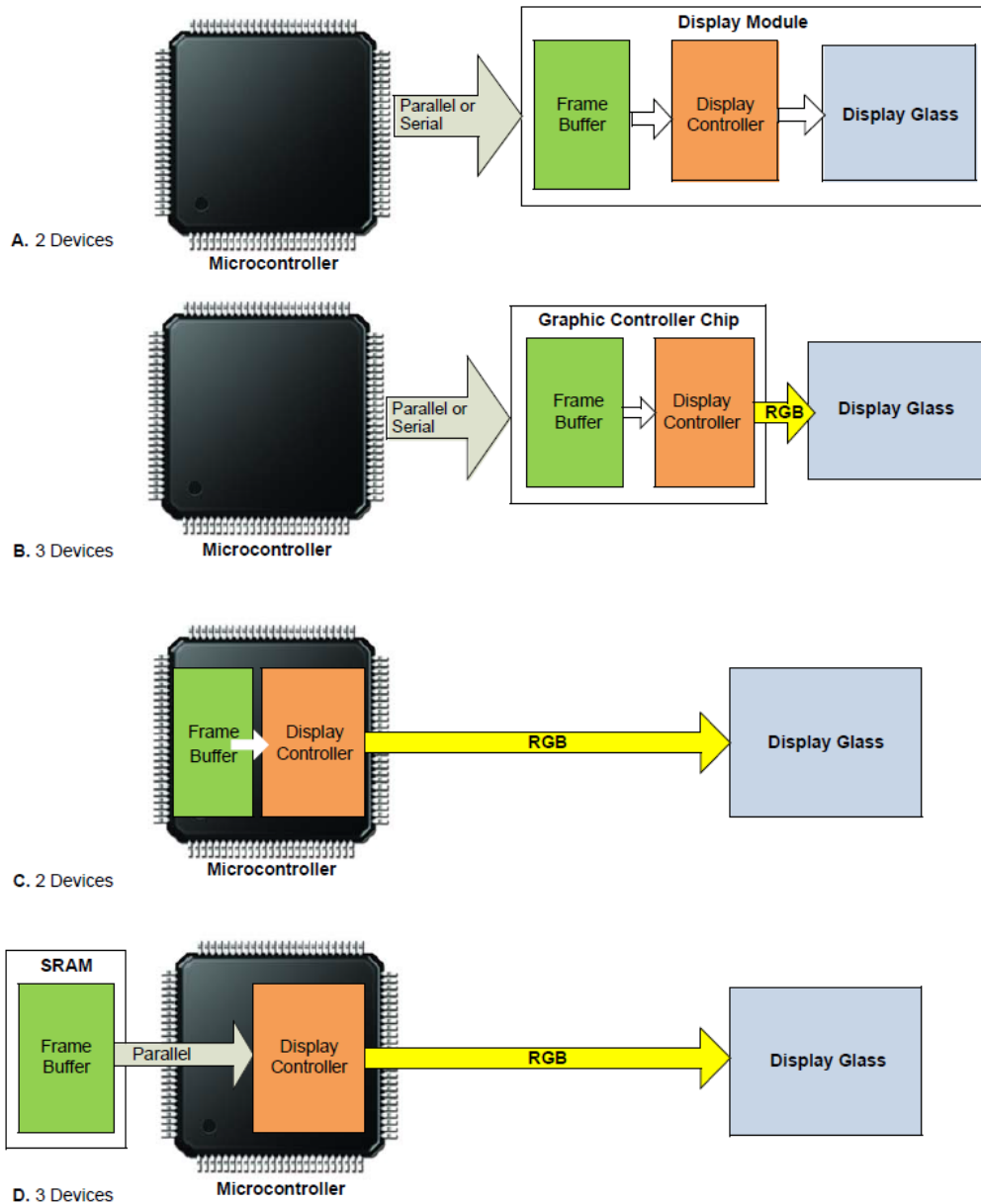


Figura 3.4 - Diferentes possibilidades de integração dos componentes gráficos [69]

Tendo em conta que o ecrã tátil disponível no laboratório, o *Microtips MTF-TQ35SP811* [70], do tipo resistivo, já inclui integrados o *frame buffer* e o controlador gráfico *Solomon Systech SSD1926* [71], verifica-se que a única solução possível é a configuração A, pelo que foi esta a adotada.

Um ecrã tátil resistivo de quatro fios (*4-Wire*) é constituído por duas camadas de material resistivo, com ligações elétricas em dois lados opostos. Estes são sobrepostos a 90° de forma a obter uma montagem semelhante à da Figura 3.5.

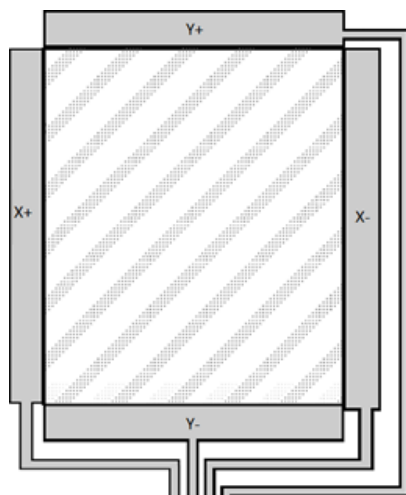


Figura 3.5 – Composição das duas camadas para formar um painel tátil resistivo, adaptado de [72]

Os quatro contactos são identificados como X-, X+, Y- e Y+, de acordo com o eixo a que são perpendiculares e com a orientação dele. A Figura 3.6 representa o método de medição da coordenada X, no qual se liga o contacto X+ à tensão de alimentação (5V no exemplo) e o contacto X- ao *ground*, medindo-se a tensão de saída num dos contactos Y (Y- no exemplo). O método de medição da coordenada Y, representado na Figura 3.7, é similar, estando o contacto Y+ ligado à tensão de alimentação e o Y- ao *ground*, sendo a medição efetuada num dos contactos X.

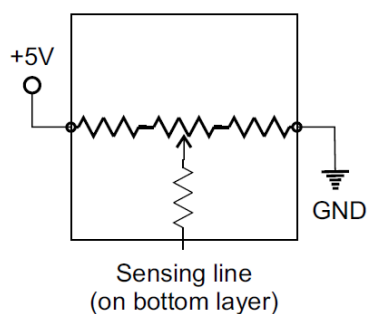


Figura 3.6 – Medição da coordenada X num ecrã tátil resistivo [72]

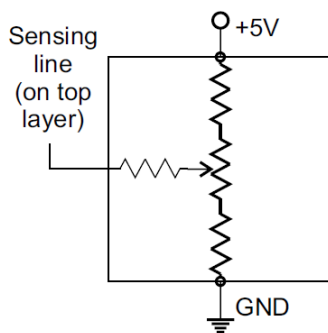


Figura 3.7 – Medição da coordenada Y num ecrã tátil resistivo [72]

Para a realização deste processo pode-se recorrer a um controlador de toque externo, comunicando por SPI ou outro protocolo de comunicação com o microcontrolador, ou diretamente ao conversor analógico-digital do microcontrolador. É de salientar que a biblioteca da *Microchip* já inclui suporte para qualquer uma das opções, podendo, no entanto, ser necessário introduzir alterações para certos modelos de controladores externos.

Com solução adotada, a utilização direta do conversor analógico-digital do microcontrolador, verifica-se que apenas serão necessárias duas entradas analógicas, podendo as restantes duas portas ser digitais.

3.2.1.2 Interface USB

A norma USB (*Universal Serial Bus*) define um protocolo de comunicação a quatro fios, dois para alimentação, +5V e GND e dois para transmissão de informação, D+ e D-. Como esta transmissão é feita de forma diferencial, é menos suscetível a ruído elétrico, uma vez que este deverá afetar de forma semelhante ambos os cabos.

Na Figura 3.8 apresenta-se um exemplo de um sinal enviado por USB segundo a norma USB 1.1, transmitido alternando as linhas entre o estado J e o estado K e utilizando uma codificação NRZI (*Non-Return to Zero Inverted*), ou seja, um bit 0 é transmitido pela alteração do estado na transição ascendente do sinal de relógio, sendo um bit 1 transmitido pela manutenção do estado na mesma transição.

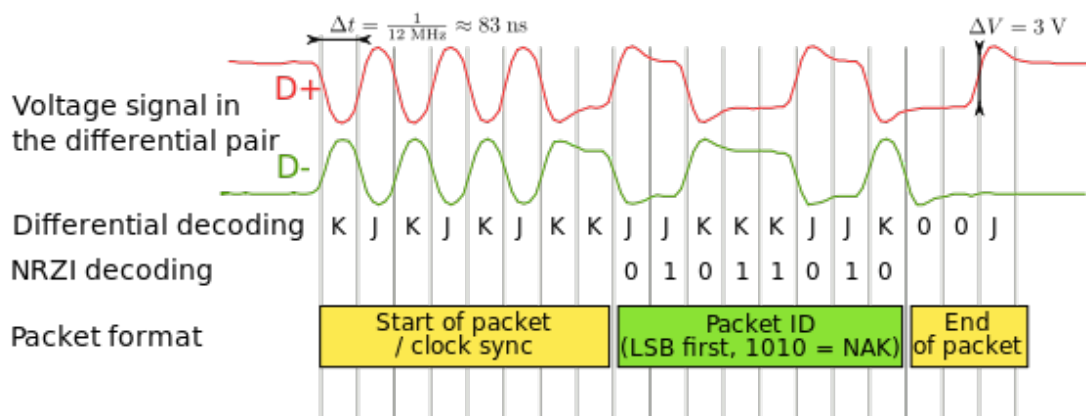


Figura 3.8 - Exemplo de um sinal enviado por USB 1.1 [73]

Tendo em conta que se pretende que este sistema seja capaz de interagir com dispositivos de armazenamento USB, tais como *flash drives*, o conector mais

indicado será uma fêmea de Tipo A, cuja disposição dos pinos se encontra representado na Figura 3.9. Para além disso, a codificação de cores *standard* dos cabos associados a cada pino encontra-se definida na Tabela 3.1.

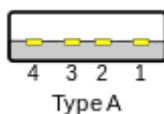


Figura 3.9 - Conector USB Tipo A e respetivo *pinout* [73]

Tabela 3.1 - Pinout USB [73]

Pino	Nome	Cor do cabo	Descrição
1	V _{BUS}	Vermelho/Laranja	+5 V
2	D ⁻	Branco/Dourado	Data -
3	D ⁺	Verde	Data +
4	GND	Preto/Azul	Ground

É de salientar que esta comunicação é suportada em determinados microcontroladores da *Microchip* por *hardware*, podendo a sua utilização ser feita através da manipulação de registos ou da utilização da biblioteca disponibilizada.

3.2.2 Desenvolvimento do Circuito Eletrónico

Foi necessário selecionar entre os microcontroladores disponíveis e compatíveis com a biblioteca gráfica da *Microchip* aquele que tem as características mais adequadas aos requisitos do sistema de monitorização.

Os microcontroladores das famílias PIC24FJxxxGAxxx e PIC24FJxxxGBxxx são indicados para a utilização com esta arquitetura gráfica e, de acordo com [74] e [75], a principal diferença entre estes é a presença de funcionalidades USB *On-The-Go* (OTG) nos PIC24FJxxxGBxxx.

Tendo em conta que se pretende, para além de monitorizar, guardar um registo, pelo menos, da medição de temperatura, verifica-se que a funcionalidade USB disponibiliza uma interface com esse potencial, pelo que foi selecionada a família de microcontroladores que a suporta.

Definiu-se que a placa de circuito impresso central deverá permitir uma liberdade de utilização, uma vez que se pretende que possa ser utilizada em diferentes projetos. Identificou-se que esta deve disponibilizar:

- Uma porta completa do microcontrolador, se possível a porta com entradas analógicas e com os *headers* posicionados sequencialmente em linha. Este facto dá uma maior flexibilidade a este módulo e permite uma mais fácil identificação e utilização de cada uma das portas;
- Dois conjuntos de portas utilizáveis para comunicação SPI: nestes microcontroladores, as funcionalidades SPI podem ser atribuídas a quaisquer entradas RP (*Remappable Peripheral* para funções de entrada ou saída) ou RPI (*Remappable Peripheral* para funções apenas de entrada). Estas portas permitem ao microcontrolador utilizar dois dos seus módulos de SPI para comunicar com dois conjuntos de dispositivo, podendo ser mestre num destes módulos e escravo no outro;
- Um conjunto de pinos de programação que possam ser utilizados com o programador;
- Um conector FFC (*Flat Flexible Cable*, por vezes também designado por FPC – *Flexible Printed Circuit*) de 33 pinos a ser utilizado para ligação aos ecrãs táteis existentes;
- Um seletor para a retroiluminação do ecrã tátil, possibilitando a escolha entre ligado (ligado aos 9V) e desligado (ligado ao *ground*);
- Um conector USB, para permitir a interface com diversos dispositivos USB;
- Um seletor para ativar ou desativar o pino A/D (AN8) que permite verificar a existência de alimentação na ligação USB, de forma a disponibilizar o pino respetivo quando não se pretender utilizar a comunicação USB;
- Três pares de pinos que disponibilizem as alimentações: não regulada de 9V, regulada de 5V e regulada de 3.3V.

As ligações relativas ao ecrã tátil foram baseadas na solução já existente e que envolve a utilização da placa de desenvolvimento *Explorer 16* [76] e de uma placa adaptadora da *ETConcept* [77]. Esta última permite a compatibilização de diversos tipos de LCDs da *Microtips*, nomeadamente os de 3.5” e os de 5.7”, com a *Explorer*. Uma vez que esta PCB será apenas utilizada com o LCD de 3.5”, apenas se incluíram as conexões necessárias para este.

Definiu-se que o controlo da retroiluminação é efetuado por *software* através do pino RC3 do microcontrolador, para além de se disponibilizar um *switch* para controlo manual.

Para efeitos de diminuição de ruído, incluíram-se condensadores de *bypass* entre todos os pares de pinos de alimentação. As ligações ao pino de *MasterClear* ($\overline{\text{MCLR}}$) foram baseadas no *datasheet* do PICkit 3 [78], o

programador utilizado, uma vez que este pino é utilizado em funções de programação.

Para a comunicação USB seguiu-se a montagem recomendada pelo *PIC24F Family Reference Manual* [79] para microcontroladores que funcionem como *host* USB, representada na Figura 3.10. Um dispositivo em modo *host* é responsável pela alimentação das comunicações USB e pela gestão das comunicações, sendo o modo de funcionamento indicado para interface com uma *flash drive*. É de salientar que o pino USBID só é necessário para sistemas com suporte para USB OTG (*On-The-Go*), uma funcionalidade que permite que o mesmo dispositivo possa funcionar tanto no modo *host* como no modo *device* e que não tem qualquer utilidade na interface com *flash drives* USB.

Ainda na Figura 3.10 é possível verificar que a aplicação USB pode utilizar um pino analógico para detetar a presença da alimentação no ramo VBUS, pelo que se incluiu essa possibilidade, juntamente com um *switch* físico que permite que, quando esta funcionalidade não é requerida, se utilize esse pino para outro efeito.

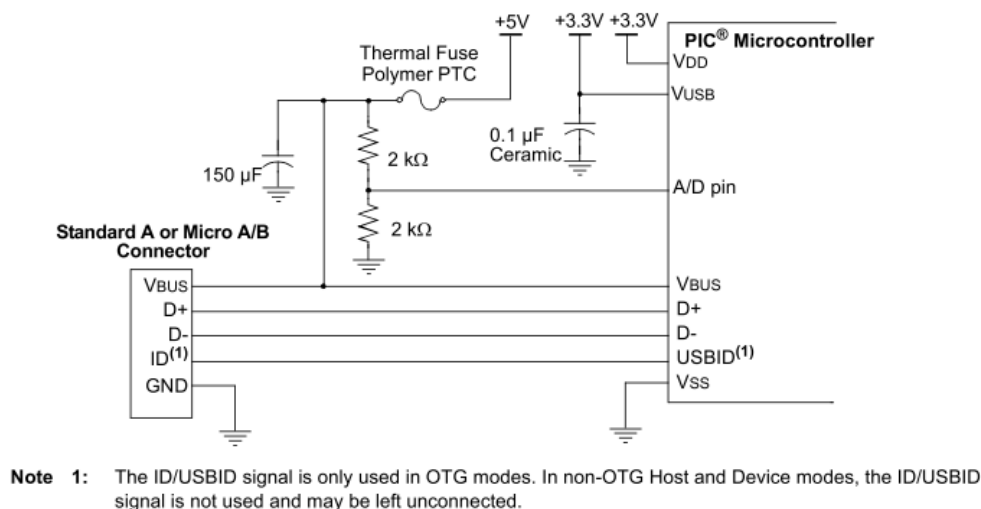


Figura 3.10 - Exemplo de interface USB *host* [79]

Para além de tudo isto, nas últimas versões da placa de circuito impresso central também se incluíram as ligações para posterior montagem de uma memória EEPROM da *Microchip*, a 25LC256. Posteriormente verificou-se que as versões mais recentes da biblioteca gráfica já não suportam memórias deste tipo e que as memórias *flash* suportadas, como a SST25VF016 possuem uma montagem em tudo semelhante, uma vez que também comunicam por SPI. No entanto, o seu *package* é ligeiramente mais largo, pelo que foi necessário aumentar o comprimento de algumas pistas.

A regulação da alimentação dos 9V para os 5V e para os 3.3V foi efetuada através de reguladores da *Maxim Integrated*, o MAX667 para 5V e o MAX884 para 3.3V, tendo sido a sua montagem efetuada de acordo com os respetivos *datasheets* [80, 81].

Depois de todos os componentes estarem definidos, foi possível definir os valores máximos de tensão de alimentação para o sistema, através da compatibilização dos requisitos destes. Tendo em conta que a maioria dos componentes é alimentada ou pelo MAX667 ou pelo MAX884, os requisitos de tensão de alimentação são definidos pelos requisitos da retroiluminação e pelos dois reguladores:

- Retroiluminação: Entre 9 e 11.4 V [70];
- MAX667: Até 16.5V [80];
- MAX884: Entre 4.3 e 11.5V [81].

Tendo em conta que os transformadores mais comuns são para 6V, 9V e 12V, recomenda-se assim a utilização dos 9V de alimentação, embora o sistema possa funcionar entre 9V e 11.4V.

3.2.2.1 EAGLE

O desenho da placa de circuito impresso foi efetuado com o *software EAGLE 5.9.0*, um editor gráfico de *layout*. Este editor permite efetuar tanto o desenho esquemático do circuito como o desenho da placa, relacionando-os. Isto permite que, após desenhar esquematicamente o circuito, o *software* indique quais os pinos que deverão ser ligados e verifique se existem fios por ligar (*airwires*). É de salientar que, embora este *software* forneça uma funcionalidade de ligação automática (*auto-route*), esta raramente permite obter soluções interessantes, uma vez que não reposiciona os componentes. Desta forma, optou-se pelo método manual iterativo para obter uma solução o mais compacta possível.

É de salientar que este *software* não é tão intuitivo como poderia ser, possuindo uma série de limitações que reduzem a fluidez de trabalho como: a dificuldade em iniciar pistas na placa de circuito impresso num local diferente do recomendado.

Durante o desenho da placa de circuito impresso, tornou-se necessário criar *packages* de componentes, ou seja, definir o símbolo esquemático do componente, as suas dimensões físicas e as suas ligações. Para tal, foi necessário criar uma biblioteca de componentes personalizada e definir a geometria desses componentes, tendo em atenção as camadas (*layers*) em que se coloca cada

informação. É de realçar que os componentes mais importantes são os pinos (*pins*) nos símbolos esquemáticos e as ligações (*pads*) na definição do *package*, sendo necessário efetuar posteriormente a conexão entre estes.

Na Figura 3.11 apresenta-se a versão final da Placa de Circuito Impresso central, obtida após um processo iterativo, com indicação dos componentes principais. É de salientar que a utilização de um conector FFC/FPC para a interface com o ecrã tátil é uma fonte de problemas, uma vez que é difícil de soldar com os meios disponíveis no LIM.

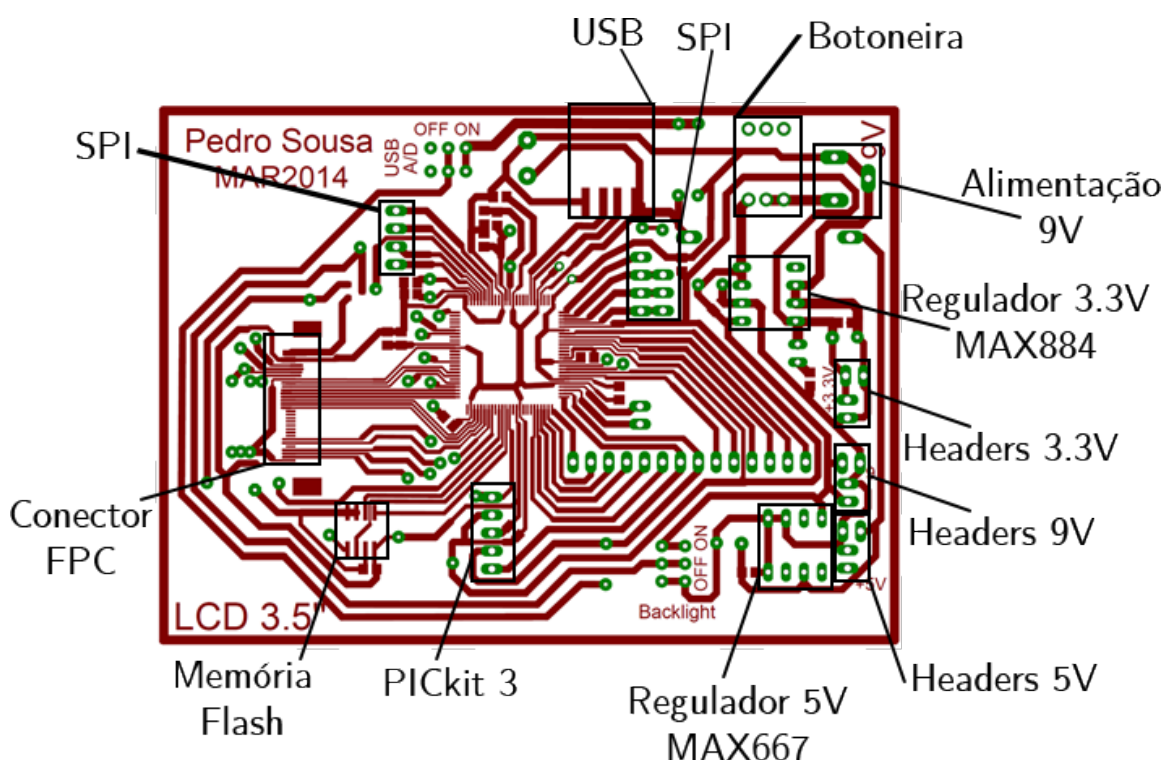


Figura 3.11 – Placa de circuito impresso central, com indicação dos principais componentes

Na Figura 3.12 apresenta-se uma fotografia da placa de circuito impresso central, na qual se podem ver os componentes de montagem em superfície. É de salientar que grande parte dos componentes é montada no seu verso.

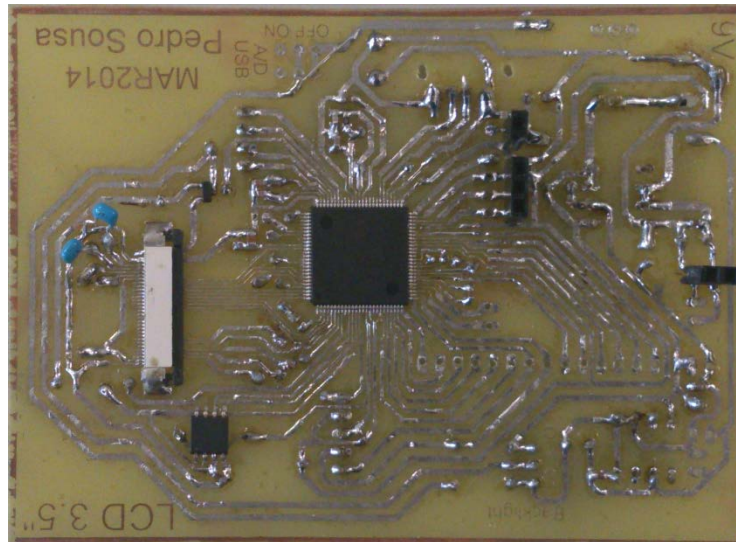


Figura 3.12 – Fotografia da placa de circuito impresso central

3.2.3 Desenvolvimento do Circuito Eletrónico para comunicação sem fios (MiWi)

A comunicação sem fios MiWi pode ser implementada neste módulo HMI através de dois modos distintos: ou utilizando apenas um microcontrolador ou utilizando dois microcontroladores. A principal vantagem do primeiro método é a redução do número de componentes utilizados, embora aumente a memória utilizada nesse microcontrolador. A segunda solução, para além de não ocupar tanta memória no microcontrolador principal, também se traduz numa implementação mais simples. Tendo isto em conta, optou-se por esta última podendo-se, no futuro, alterar para a outra solução através da junção das características das duas PCBs.

Tendo em conta que a comunicação MiWi se encontra disponível para grande parte dos microcontroladores da *Microchip*, a seleção do microcontrolador a utilizar dependeu principalmente da necessidade de utilizar dois módulos SPI, um para a comunicação com a antena MiWi e outro para a comunicação com o microcontrolador da placa central. De entre os microcontroladores que cumprem estes requisitos, optou-se pelo PIC24FJ128GA010, uma vez que era aquele que se encontrava disponível.

Desta forma, foi necessário organizar as ligações de modo a suportarem o transceptor MRF24J40MA e a permitir o encaixe com a placa de circuito impresso central através de *headers*. As dimensões exteriores desta placa também foram definidas de forma a serem semelhantes às da PCB central, de forma a ser possível suportá-las da mesma forma.

Na Figura 3.13 mostra-se tanto o resultado final da placa de circuito impresso MiWi do módulo HMI como o seu posicionamento relativamente ao contorno exterior da placa de circuito impresso para interface com o ecrã tátil. A borda exterior traduz os contornos da placa de circuito impresso para interface com o ecrã tátil.

Na Figura 3.14 apresenta-se uma fotografia desta placa de circuito impresso, na qual se pode ver a materialização da placa de circuito impresso MiWi. É de salientar que as ligações à placa central, identificadas como SPI e Headers 3.3V na Figura 3.13, se encontram do lado não visível da placa.

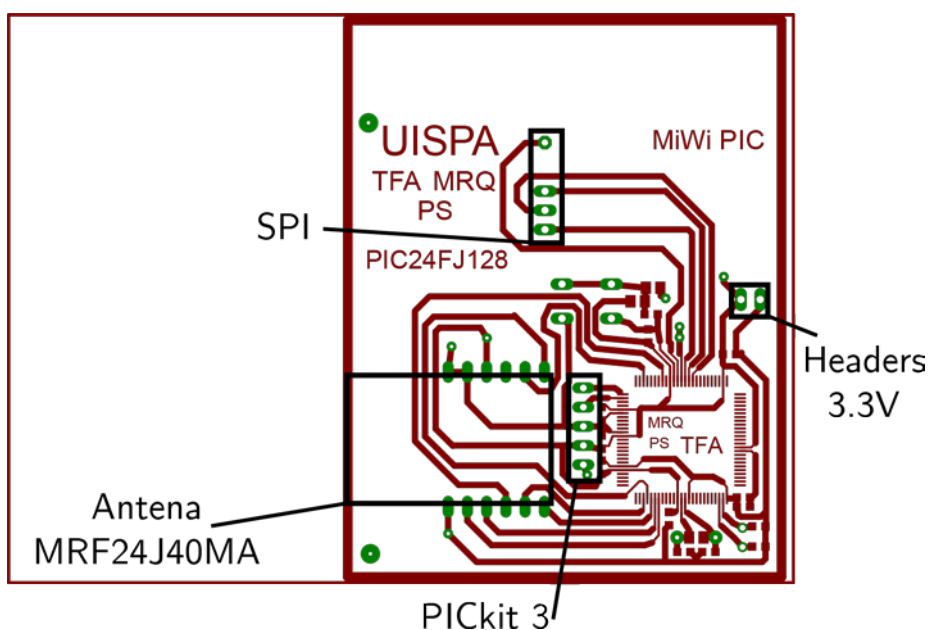


Figura 3.13 – Placa de circuito impresso MiWi do módulo HMI com indicação dos principais componentes

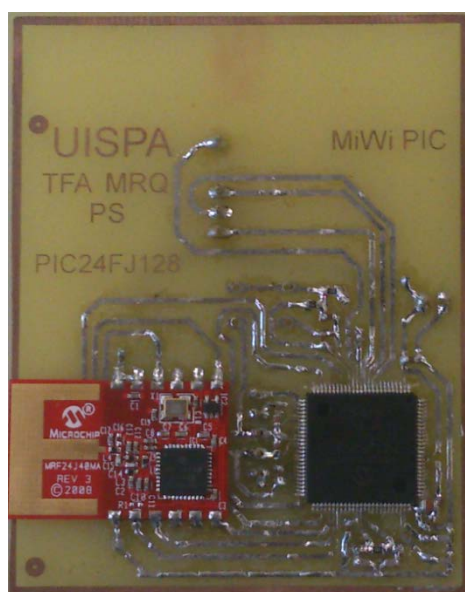


Figura 3.14 - Fotografia da placa de circuito impresso MiWi do módulo HMI

Na Figura 3.15 apresenta-se uma fotografia da ligação entre a placa de circuito impresso MiWi e a placa de circuito impresso central.

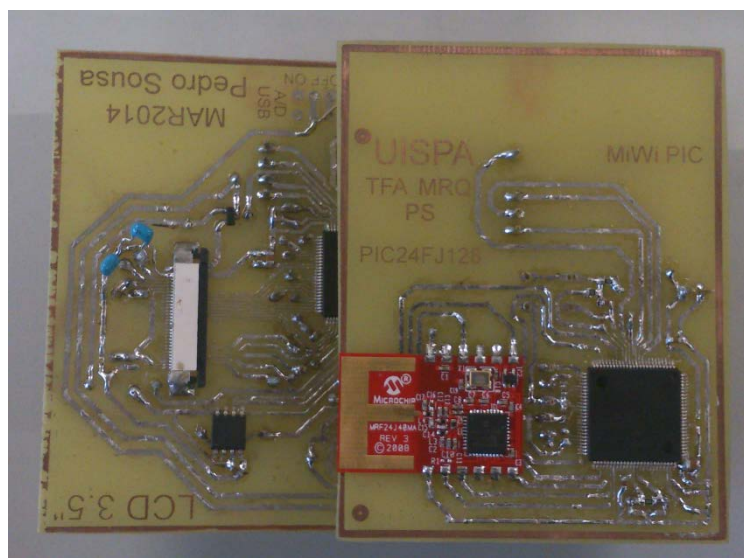


Figura 3.15 - Fotografia da ligação entre a PCB central e a PCB MiWi

3.2.4 Desenvolvimento do alojamento do módulo HMI

Tendo ambas as placas que constituem este módulo, a PCB central e a PCB MiWi, tornou-se necessário desenhar uma caixa para alojar este sistema. Tendo em conta que existia a possibilidade de utilizar uma impressora 3D que se encontra instalada no LIM, foi desenhada uma caixa com este tipo de prototipagem em mente.

Assim, foi necessário ter em conta vários fatores, nomeadamente:

- A estrutura interna das peças imprimidas é alveolar, pelo que o enchimento é definido a partir da resistência mecânica necessária para o sistema;
- O processo de impressão exige uma base de sustentação plana, uma vez que a impressão é feita por camadas sem material de suporte;
- A união de peças impressas deve ser feita através de porca e parafuso, uma vez que não é possível rosca-las satisfatoriamente;
- As peças sofrem uma variação dimensional devida às variações de temperatura, pelo que é necessário considera-las no projeto;
- Para a obtenção da geometria final pode ser necessário recorrer a outros processos, nomeadamente furação e limagem;

- A impressão de inscrições em baixo relevo deve ser feita ao alto, ou seja, perpendicularmente à base de sustentação da peça, uma vez que na impressora em questão isto origina melhores resultados;
- Sempre que possível devem-se definir concordâncias entre planos e nervuras de suporte, de forma a aumentar a rigidez mecânica das estruturas.

Tendo estas condições em conta, foi possível obter, através de iterações sucessivas, uma estrutura com as seguintes características:

- Ligações ao exterior apenas à direita e atrás da caixa, uma vez que se pretende que estas se encontrem pouco visíveis durante a utilização normal do sistema;
- Botão Ligar/Desligar e *jack* de alimentação à direita e ligação RJ45 e USB atrás da caixa;
- Fixação da ficha RJ45 através de uma placa de circuito impresso aparafusada à parede;
- Fixação da porta USB através de um cabo de montagem em painel;
- Encaixe por deslizamento para as duas placas de circuito impresso: uma para o ecrã tátil e outra para a comunicação sem fios MiWi;
- Suporte para o ecrã tátil;
- Inscrições em baixo-relevo com o nome do autor e dos orientadores e com o logotipo da universidade e indicação da faculdade;
- Batentes nos topos para posicionar as placas de circuito impresso;
- Aberturas internas para colagem das porcas para posicionamento;
- Base em chapa de alumínio, uma vez que já se encontra disponível e evita a impressão de peças desnecessárias.

Para alimentar o módulo de sensores internos existem duas opções: incluir baterias neste ou alimentá-lo através do exterior. Tendo em conta que a distância entre o módulo HMI e o módulo de sensores internos é reduzida e que se verificou que é possível passar um cabo pela borracha de isolamento da porta da câmara frigorífica, optou-se pela segunda opção. Esta permite que o sistema funcione sem necessidade de carregamento de baterias, o que se traduz em menos uma preocupação para os utilizadores.

É de salientar que a escolha de uma ligação com conectores RJ45 advém da disponibilidade destes conectores e da fixação provida por eles. Num eventual produto comercial, o mais indicado seria utilizar um conector proprietário para evitar que os utilizadores tivessem tendência de ligar os módulos à rede *ethernet*.

Para a inclusão da ficha RJ45 nesta caixa, foi necessário desenhar uma placa de circuito impresso adicional para converter as ligações desta em *headers* e permitir a sua fixação.

Na Figura 3.16 apresenta-se o *render* final do conjunto da montagem da caixa com indicação das principais características.

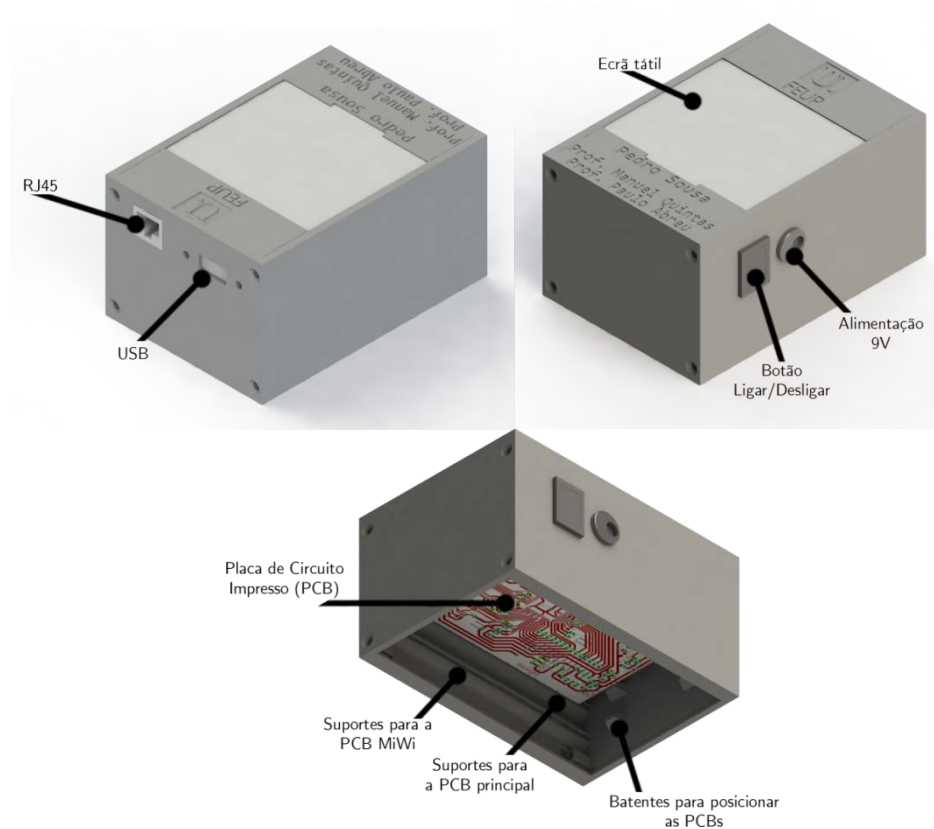


Figura 3.16 – Indicação das principais características da caixa desenhada para suporte do ecrã tátil

3.3 Módulo de sensores internos

No interior da câmara frigorífica são colocados os sensores de humidade, temperatura e abertura da porta, de acordo com a arquitetura apresentada na Figura 3.17. Assim, foi necessário desenvolver uma placa de circuito impresso dotada de um microcontrolador e uma caixa de alojamento, que são descritas nos pontos seguintes deste relatório.

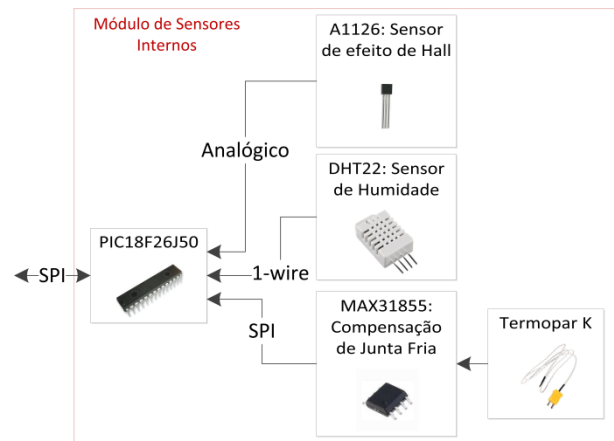


Figura 3.17 - Arquitetura do módulo de sensores internos

3.3.1 Desenvolvimento do Circuito Eletrónico

A placa de circuito impresso desenvolvida providencia as ligações para cada um dos sensores, para além de disponibilizar um conector RJ45 para alimentação e comunicação SPI com o microcontrolador do ecrã tátil.

Para a ligação do termopar utilizou-se um conector fêmea, representado na Figura 3.18, de forma a ser possível substituir facilmente o termopar em caso de necessidade.



Figura 3.18 – Conector fêmea para termopar [82]

Tendo em consideração estas funcionalidades, foram definidos os requisitos que o microcontrolador deste módulo deve possuir:

- Dois módulos de SPI: um para comunicação com o MAX31855 e outro para comunicação com o microcontrolador do ecrã tátil;
- Conversor analógico-digital (ADC – *Analog Digital Converter*) de, pelo menos, 10 bits;
- De preferência, com *package* PDIP (*Plastic Dual In-Line*), para permitir testes em *breadboard*;
- De preferência, um microcontrolador de 8 bits, devido ao seu custo ser mais reduzido que o dos de 16 e 32 bits.

Tendo isto em conta, verificou-se que, entre os microcontroladores disponíveis no LIM, o PIC18F26J50 cumpria todos estes requisitos, o que motivou a sua utilização.

Uma alternativa seria a ligação direta por SPI entre o MAX31855 e o microcontrolador do ecrã tátil. No entanto, a centralização da informação dos sensores internos neste microcontrolador permite reduzir o número de fios a utilizar e permitir uma maior autonomia do módulo.

A partir da definição do *hardware* a utilizar, desenvolveu-se a maioria da eletrónica necessária numa *breadboard*, de forma a ser possível testar os sensores, tendo-se posteriormente desenhado uma placa de circuito impresso para este módulo. No projeto desta placa pretendeu-se obter as seguintes características:

- O maior isolamento possível entre as comunicações e a ligação do termopar, uma vez que o sinal proveniente deste tem uma sensibilidade de aproximadamente $40 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ e o ruído pode afetar essa leitura;
- A possibilidade de fixar o conector do termopar à placa sem soldar os componentes;
- A utilização de um suporte (*socket*) para o microcontrolador, permitindo a sua fácil substituição em caso de necessidade;
- Utilização de *headers* para a ligação dos restantes sensores;
- Ligação RJ45 para interface com o módulo HMI.

Todos os componentes utilizados neste sistema são alimentados a 3.3V, que devem ser regulados a partir de uma tensão de alimentação mais elevada. Para tal, utilizou-se um DCR010503 da *Texas Instruments*, uma vez que este possui um isolamento inerente. Este regulador exige uma alimentação a 5V, que pode ser fornecida pela placa-mãe de duas formas possíveis:

- Alimentação direta pelos 5V da placa do ecrã tátil;
- Regulação dos 9V não regulados para 5V na placa de sensores internos.

A primeira opção reduz o número de componentes necessários nesta placa, embora limite a corrente que pode ser fornecida aos dispositivos USB no módulo HMI e aumente o ruído à entrada do regulador DCR010503, devido à maior distância entre a regulação para 5V e a sua utilização.

A norma USB 2.0 permite aos dispositivos USB um consumo de até 500 mA, enquanto o regulador utilizado para a alimentação das comunicações USB apenas permite disponibilizar até 250 mA. Tendo em conta que uma *flash drive* USB tem um consumo na ordem dos 100 mA e que o consumo do sistema de

sensores é da ordem dos 20 mA, a utilização de um único regulador seria suficiente.

No entanto, para permitir a utilização da placa central do módulo HMI com outro tipo de dispositivos USB, optou-se por não limitar ainda mais a corrente que poderá ser fornecida e regular de 9V para 5V diretamente na placa de sensores internos.

Na Figura 3.19 apresenta-se o desenho final da placa de circuito impresso com indicação dos principais componentes. É de salientar que ainda foi necessário tornar os *grounds* antes e após o isolamento comuns, de forma a permitir uma comunicação por SPI com o microcontrolador central robusta.

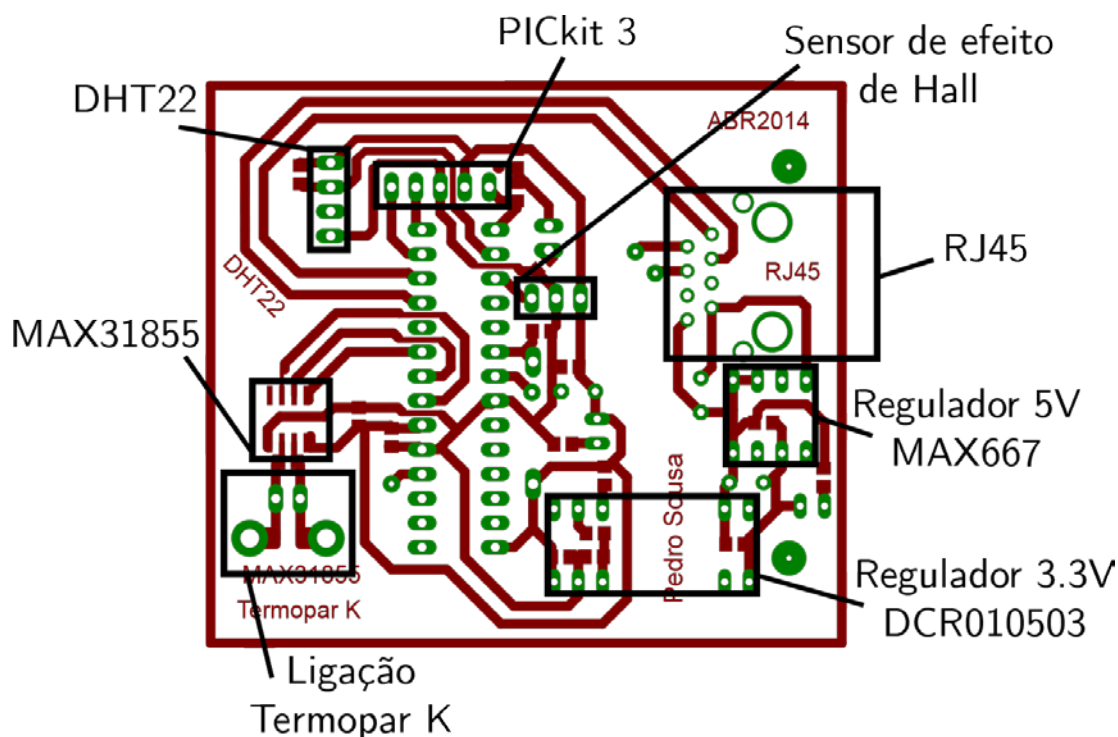


Figura 3.19 – Desenho final da placa de circuito impresso dos sensores internos com indicação dos principais componentes

Na Figura 3.20 apresenta-se uma fotografia desta placa do lado oposto ao mostrado no desenho da figura anterior. Nesta pode-se ver a maioria dos componentes.

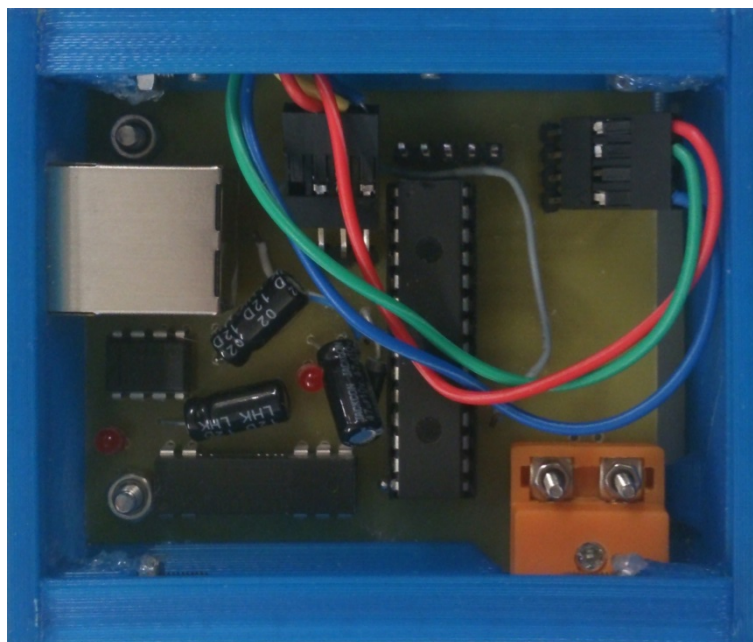


Figura 3.20 – Fotografia dos componentes da placa de circuito impresso dos sensores internos

3.3.2 Desenvolvimento do alojamento do módulo de sensores interno

Tendo a placa de circuito impresso desenvolvida, também se tornou necessário desenhar uma caixa de alojamento para este módulo, pelo que se seguiu uma lógica semelhante à utilizada para projetar a caixa para o ecrã tátil.

Desta forma, foi possível obter uma caixa com as seguintes características:

- Encaixe RJ45, para ligação ao módulo HMI;
- Ligações apenas nas faces laterais e frontal;
- Terminal fêmea para termopar de tipo K;
- Possibilidade de remover qualquer um dos sensores sem necessidade de desmontar a caixa;
- Isolamento de borracha para evitar a entrada de humidade no módulo;
- Tamanho reduzido;
- Fixação do sensor de humidade DHT22 por ligação aparafusada.

Na Figura 3.21 e na Figura 3.22, apresenta-se a caixa vista de duas perspetivas diferentes e com indicação das suas características principais.

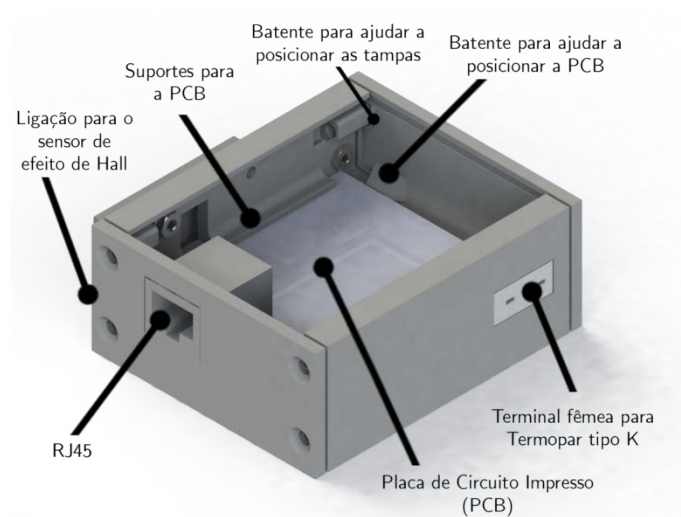


Figura 3.21 – Alojamento projetado para o módulo de sensores internos e identificação de características (vista frontal)

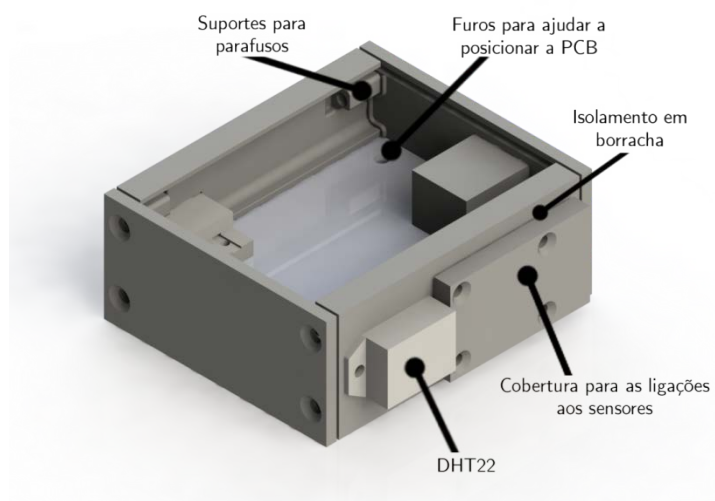


Figura 3.22 – Alojamento projetado para o módulo de sensores internos e identificação de características (vista alternativa)

3.4 Módulo de sensor externo

Para medir o consumo energético da câmara frigorífica, é necessário ter acesso à alimentação elétrica, pelo que este módulo de medição deve ser colocado entre a tomada elétrica e o cabo de alimentação do frigorífico.

Poder-se-ia optar por projetar de raiz a caixa de suporte para a eletrónica necessária ou reutilizar uma caixa existente. Tendo em conta as limitações do processo de prototipagem utilizado e a existência de várias caixas reutilizáveis, optou-se por esta última opção, tendo-se selecionado a caixa apresentada na

Figura 3.23. Esta opção implica um espaço limitado para alojar a eletrónica a desenvolver.



Figura 3.23 - Caixa utilizada para a eletrónica de medição do consumo energético

Na Figura 3.24 apresenta-se a arquitetura de interligação entre os principais elementos que constituem este módulo.



Figura 3.24 – Arquitetura do módulo de sensor externo

3.4.1 Desenvolvimento do Circuito Eletrónico

Este circuito foi projetado para a utilização do sensor de corrente ACS712, tendo sido adaptado posteriormente para permitir o funcionamento com o sensor de corrente desenvolvido.

A antena de comunicação MiWi MRF24J40MA requer uma tensão de alimentação de 3.3 V. Por outro lado, o sensor de corrente ACS712 exige uma alimentação a 5 V.

Tendo em conta que será necessário utilizar ambos no mesmo circuito, uma alternativa passa pela utilização de dois microcontroladores, um alimentado a 5V para a medição da corrente e outro alimentado a 3.3V para a comunicação MiWi, comunicando entre si por SPI. Esta solução, para além de utilizar um grande número de componentes, implica a utilização de um conversor de nível, no caso de os pinos do microcontrolador de 3.3V não serem tolerantes a 5V. Outra alternativa passa por converter a gama de saída 0 a 5V numa gama 0 a 3.3V. Para tal, pode-se utilizar um divisor de tensão que fornece uma relação

linear entre a tensão de entrada e a de saída, com uma constante de proporcionalidade dependente do valor das resistências utilizadas.

Na Figura 3.25 está representado esquematicamente um divisor de tensão. É do conhecimento geral que o valor de tensão obtido será:

$$ADC_{input} = V_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

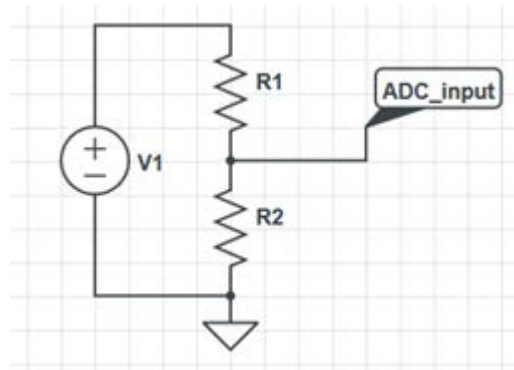


Figura 3.25 - Divisor de tensão

Tendo em conta que a proporção entre R_1 e R_2 é que determina o valor de tensão obtido em ADC_{input} é possível verificar que existem várias soluções para este problema, com uma razão $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ que vale $0.66 = \frac{3.3}{5}$.

Recorrendo ao *CircuitLab* (www.circuitlab.com), foi possível testar várias soluções, tendo-se chegado à conclusão que uma boa solução passa por ter $R_1 = 47\text{k}\Omega$ e $R_2 = 91\text{k}\Omega$, o que se traduz numa razão de aproximadamente 0.66, utilizando apenas valores normalizados de resistências.

No entanto, a saída do ACS712 não varia na totalidade da gama de 0 a 5V, variando apenas entre 1.6 V e 3.4 V, como se pode ver pela característica do sensor apresentada na Figura 3.26. Assim, é possível constatar que este sensor é diretamente utilizável com o microcontrolador de 3.3V se se limitar a corrente a um máximo de 4 A.

A alimentação deste módulo pode ser feita através de uma de duas possibilidades: alimentação através de um transformador externo ou alimentação autónoma. Uma vez que é normal e muito mais conveniente que este tipo de sistemas se alimente autonomamente, optou-se por essa opção.

Devido ao espaço reduzido disponível e ao facto de não ter sido possível desenvolver um transformador próprio, reutilizou-se uma fonte comutada de um carregador USB.

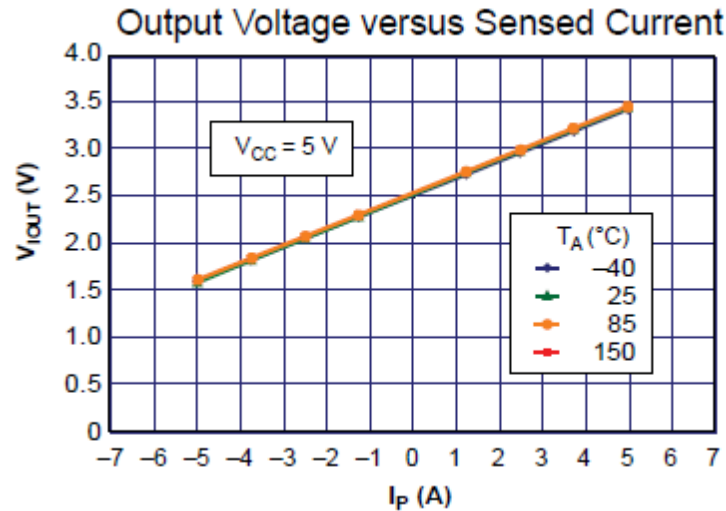


Figura 3.26 – Saída do sensor de corrente ACS712-5A em função da corrente que o percorre [48]

Normalmente, a utilização de fontes comutadas com componentes eletrônicos não é o mais indicado, pelo que se procurou reduzir esse efeito através de uma camada de isolamento entre a fonte e a PCB, composta por borracha (isolamento elétrico) e folha de alumínio (isolamento eletromagnético).

Para regular a tensão obtida à saída desse transformador, recorreu-se a um regulador para 3.3V, o TC1262 da *Microchip*. Este regulador tem a vantagem de ter uma montagem simplificada o que permitiu incluí-lo facilmente na PCB, para além de ser capaz de lidar com grandes correntes.

A PCB desenvolvida para a eletrónica deste módulo deve ter tanto a forma da PCB do sistema original da caixa a utilizar como os mesmos pontos de fixação. Alterando a solução de comunicação MiWi já desenvolvida no Capítulo 3.2.3, foi projetado o circuito representado na Figura 3.27. Na Figura 3.28 apresenta-se uma fotografia deste circuito após impressão e montagem dos componentes.

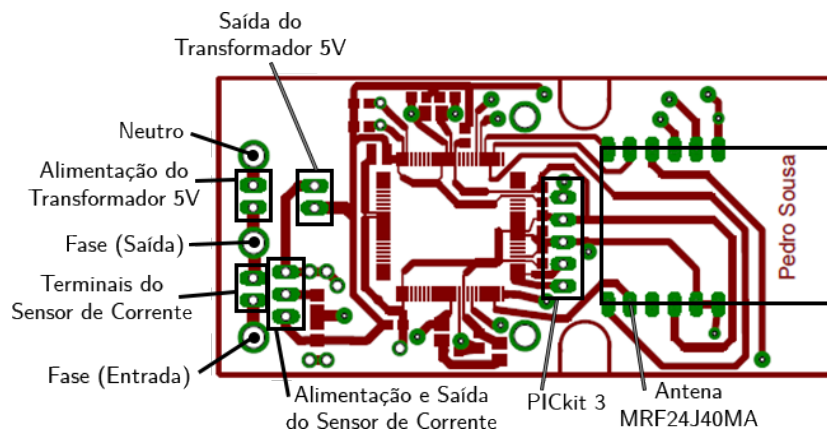


Figura 3.27 - Circuito impresso desenvolvido para a medição de corrente elétrica, com indicação dos principais componentes e interfaces

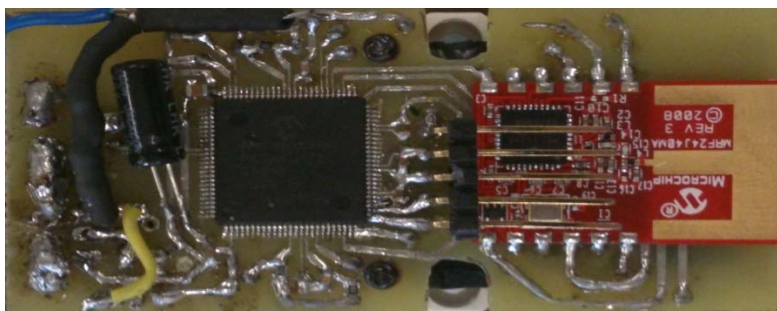


Figura 3.28 – Fotografia da placa de circuito impresso de sensor externo

A alteração de dispositivo sensor não trouxe grandes alterações à placa desenvolvida, embora tenha alterado significativamente a montagem dos componentes na caixa. A única alteração significativa introduzida à placa pela utilização deste sensor foi a inclusão de uma resistência de *pull-down* à saída do sensor, de forma a permitir um escoamento mais fácil da corrente e, assim, uma maior repetibilidade do sensor. Experimentalmente, o valor de $1\text{ k}\Omega$ foi aquele que se traduziu numa melhor recuperação do sensor, sem perda de sensibilidade.

É importante salientar que o consumo do sistema de medição também é incluído na medição, pelo que o transformador apenas é alimentado após a ligação ao sensor. Isto obriga a ter o sensor instalado para ser possível alimentar o sistema através deste transformador.

3.5 Conclusão

Neste capítulo, começou-se por descrever a arquitetura utilizada para o sistema de monitorização desenvolvido, tendo-se posteriormente feito uma descrição do desenvolvimento de *hardware* efetuado para cada módulo, bem como o desenvolvimento de caixas de alojamento de hardware para dois dos módulos e a acomodação do terceiro no alojamento reutilizado.

Para além disso, abordaram-se as comunicações utilizadas na interface entre o microcontrolador e o ecrã tátil, o que permitiu compreender as ligações que são necessárias à implementação, para além de facilitar a deteção e resolução de problemas de eletrónica.

4 Desenvolvimento de *Software*

A programação de todos os microcontroladores foi efetuada no IDE (*Integrated Development Environment* – Ambiente de desenvolvimento integrado) MPLAB X versão 2.00, da *Microchip*. Esta versão do *software* de desenvolvimento foi utilizada com o compilador XC8 para microcontroladores de 8 bits, o XC16 para microcontroladores de 16 bits e o XC32 para microcontroladores de 32 bits. É de salientar que existem distinções entre as instruções em C suportadas por cada um dos compiladores.

Ao longo da realização deste trabalho, foi necessário utilizar todos estes compiladores, uma vez que se tornou necessário programar diferentes tipos de microcontroladores, de diferentes famílias:

- Da família PIC18, de 8 bits:
 - PIC18F4431 para interface com um LCD 16×2, entre outros, durante a fase de testes;
 - PIC18F26J50 para interface com os sensores internos;
- Da família PIC24, de 16 bits:
 - PIC24FJ128GA010 para interface com as antenas MiWi e o sensor de corrente;
 - PIC24FJ256GB110 para interface com o ecrã tátil;
- Da família PIC32MX, de 32 bits:
 - PIC32MX795F512L, da PIC32 Ethernet Starter Kit, para interface com a Multimedia Expansion Board durante a fase de testes.

De entre estes microcontroladores, a solução final utilizou apenas três, o PIC18F26J50 da família PIC18 e ambos os microcontroladores da família PIC24.

4.1 Comunicações

Uma parte muito importante de um sistema modular é a comunicação entre os diferentes módulos que o constituem. Para tal, começa-se por abordar cada um dos protocolos de comunicação utilizados, nomeadamente no que toca ao seu funcionamento e à sua implementação.

4.1.1 Protocolo 1-wire

O sensor digital de humidade e temperatura DHT22 comunica através de um protocolo 1-wire, no qual, como o nome indica, toda a comunicação entre os componentes é efetuada através de um único fio.

Este é um protocolo de comunicação com um conceito semelhante ao protocolo I²C mas com menores taxas de transferência de dados e maior alcance, sendo tipicamente utilizado com dispositivos pequenos e de baixo custo.

Diversas empresas, nomeadamente a *Maxim Integrated*, fornecem produtos com comunicações 1-wire que podem diferir do utilizado por este sensor tanto nos tempos que definem cada valor lógico como no componente que tem controlo da linha num determinado momento.

Neste sistema de comunicação o microcontrolador leva a linha ao valor do *ground* (GND) durante, no mínimo, 1 ms, devolvendo ao valor da alimentação (VCC) durante, no mínimo durante 20 a 40 μ s, antes de libertar a linha. Durante esta fase, o pino respetivo está definido como *output* na programação do microcontrolador, passando a estar definido como *input* na fase seguinte, de forma a permitir que o sensor tenha controlo sobre a linha. De seguida, o sensor responde com 80 μ s em GND e 80 μ s em VCC [34].

A transferência de dados é efetuada de um modo semelhante, sendo o valor 0 representado por uma sequência com 26 a 28 μ s em VCC e o valor 1 representado por uma sequência com 70 μ s em VCC [34]. A sequência de comunicação completa está representada na Figura 4.1 e é válida para todos os sensores da família como, por exemplo, o DHT11 e o DHT22. Nesta figura também é possível verificar que, após o sinal inicial, a linha estará sempre sob o controlo do sensor.

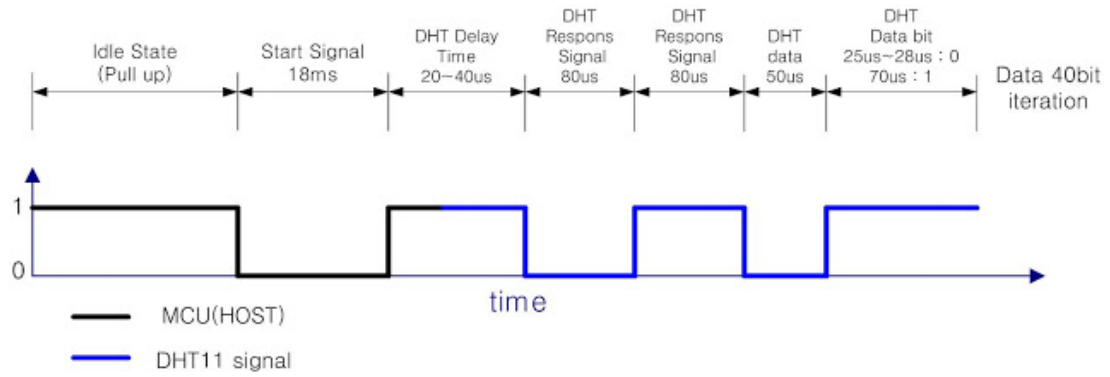


Figura 4.1 - Comunicação 1-wire com sensores DHT11 ou DHT22 [83]

Os dados transmitidos vêm segundo a seguinte ordem: dois *bytes* relativos à humidade relativa, dois *bytes* relativos à temperatura e um *byte* de *checksum*. Este último permite verificar se a transmissão foi efetuada com sucesso ou não e corresponde à soma direta dos quatro *bytes*.

O DHT22 permite a obtenção de dados até à casa decimal diretamente em graus Celsius e em percentagem de humidade relativa, para além de permitir a obtenção de valores negativos de temperatura.

O valor da temperatura a obter será negativo quando o *bit* mais significativo (MSB) for 1, sendo obtido a partir da composição dos dois *bytes* respetivos, excluindo o primeiro *bit* e dividindo o resultado por 10. Na Tabela 4.1 apresenta-se um exemplo de conversão entre a representação binária e o valor em graus Celsius correspondente.

Tabela 4.1 - Correspondência entre os *bytes* recebidos e o valor da temperatura

<i>Bytes</i> relativos à temperatura	Valor em °C correspondente
0000 0001 0101 1111	$351/10 = 35.1$
1000 0000 0110 0101	$-101/10 = -10.1$

O valor de humidade relativa a obter segue o mesmo procedimento, sem necessidade de excluir qualquer *bit* já que esta propriedade não pode tomar valores negativos.

4.1.1.1 Implementação

No diagrama de blocos da Figura 4.2 está representado o procedimento de comunicação 1-wire implementado.

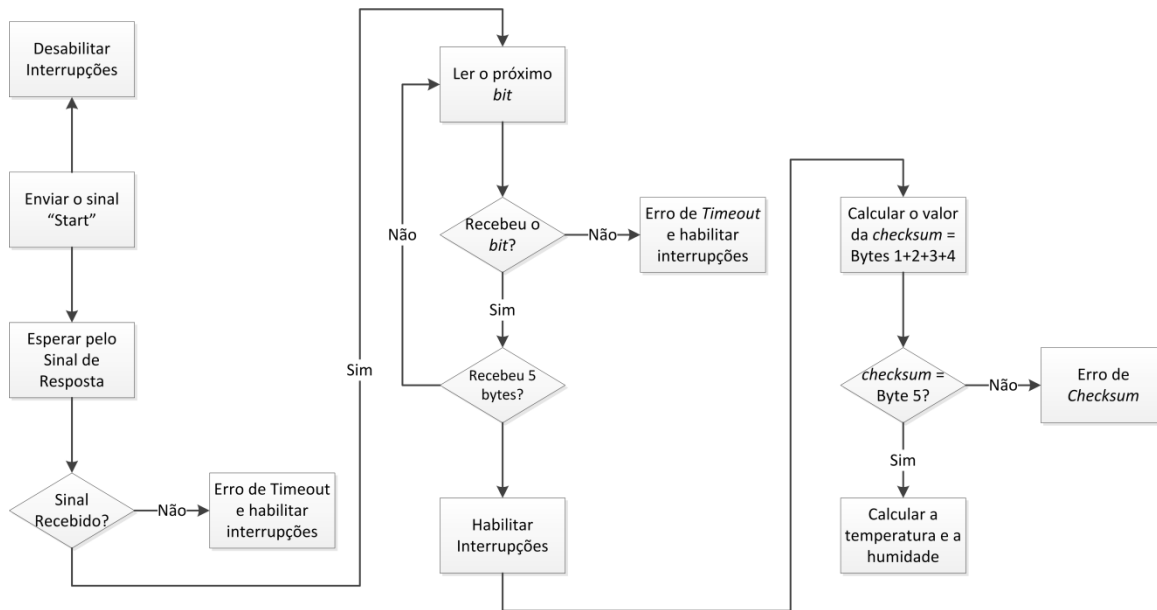


Figura 4.2 – Diagrama de blocos do procedimento utilizado para efetuar a leitura do sensor de humidade e temperatura DHT22

É de salientar a importância de desabilitar as interrupções durante esta comunicação, uma vez que, para além de esta apenas ocorrer a cada 2 segundos, envolve temporizações precisas e a geração de interrupções durante estas aquisições pode levar à leitura de um valor errado, gerando um erro de *Checksum*, ou impossibilitar a comunicação, gerando um erro de *Timeout*. Isto deve-se ao facto de a sub-rotina associada à interrupção em questão poder levar um tempo superior ao necessário para ler cada *bit* enviado pelo sensor, impedindo assim uma leitura consistente dos valores enviados por este.

O procedimento de leitura de cada um dos bits encontra-se representado com maior detalhe na Figura 4.3.

O valor de $50\mu\text{s}$ de tempo de espera referido na figura foi definido tendo em conta os tempos definidos no protocolo de comunicação. Um *bit* de valor um deverá manter a linha no valor lógico alto durante $70\mu\text{s}$, enquanto um valor zero deverá fazê-lo durante 25 a $28\mu\text{s}$. A partir disto pode-se inferir que $28\mu\text{s} < t_{\text{espera}} < 70\mu\text{s}$. Por outro lado, como o tempo em zero, independentemente do *bit* enviado, deverá ser na ordem dos $50\mu\text{s}$, verifica-se que $t_{\text{espera}} < 25 + 50 = 75\mu\text{s}$, o que é compatível com a definição anterior.

Deste modo, de forma a ter uma certa segurança, a melhor solução deverá passar por um valor intermédio, tendo-se optado pelo valor de $50\mu\text{s}$.

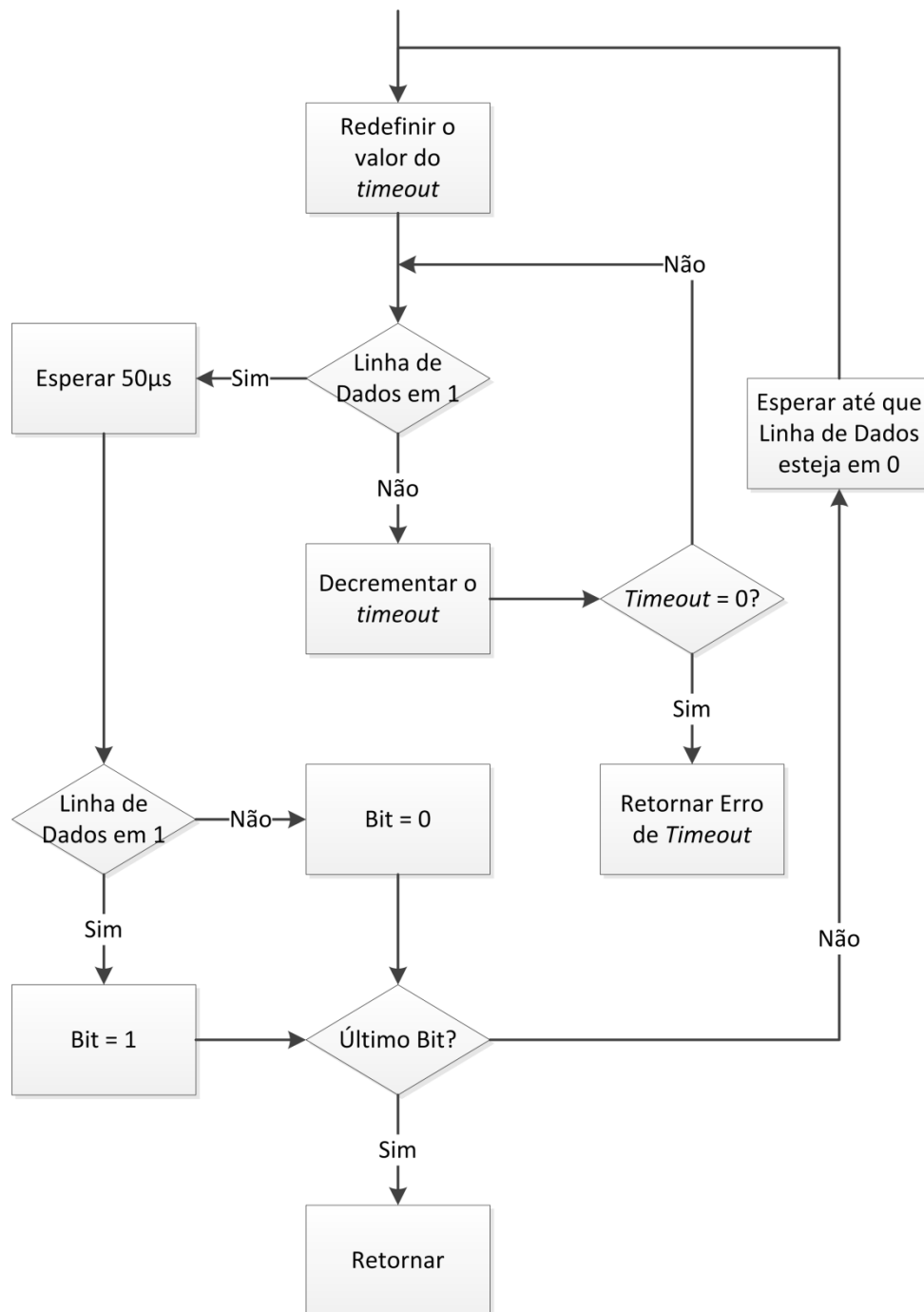


Figura 4.3 – Diagrama de blocos representativo do processo utilizado para a leitura de cada bit

De forma a garantir que o programa não saltava a leitura de nenhum *bit*, foi necessário definir uma espera entre a leitura de dois *bits*. Quando o *bit* lido vale um, a linha poderá permanecer no valor lógico alto durante um tempo superior ao necessário para a sua escrita, o que poderia levar o microcontrolador a saltar o ciclo de espera no valor lógico baixo. Esta espera só é feita quando há um novo *bit* para ser lido, uma vez que, assim, o microcontrolador não perde tempo à espera da transição descendente relativa ao último *bit*.

4.1.2 Protocolo SPI

O protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*) é um protocolo síncrono que permite que o dispositivo mestre (*master*) inicie a troca de informação com um dispositivo escravo (*slave*), sendo utilizado para movimentar informação de uma forma simples e rápida entre dispositivos, tipicamente através de quatro fios [84].

Neste sistema de monitorização, este protocolo é usado para a realização de diversas comunicações, nomeadamente:

- Entre os dois microcontroladores do módulo HMI;
- Entre o módulo HMI e o módulo de sensores internos;
- Entre o microcontrolador da placa de sensores internos e o circuito integrado de compensação de junta fria MAX31855.

Este protocolo é normalmente implementado através de módulos de *hardware*, permitindo uma comunicação série de alta velocidade entre dois ou mais dispositivos de implementação relativamente simples [84].

Uma vez que se trata de um protocolo síncrono, o mestre disponibiliza um sinal de relógio para permitir essa sincronização, através de um pino normalmente designado como SCK, que define os instantes em que a informação é alterada e em que deve ser lida. Por causa disto, este sinal de relógio é essencial para a transferência de informação.

Tendo em conta que este protocolo foi desenvolvido para troca de informação, qualquer dispositivo terá sempre de enviar e receber dados, sendo necessário ler os dados recebidos pelo módulo SPI no programa do microcontrolador para evitar a sua desativação.

Para além disto, como este protocolo permite a comunicação de um mestre com vários escravos, é necessário um método para seleccionar qual deles comunicará com o mestre num dado instante. Para tal, recorre-se a um sinal de seleção, conhecido como *Slave Select* (SS) ou *Chip Select* (CS), que pode ser opcional quando se comunica apenas com um escravo. Tipicamente, quando este sinal se encontra no nível lógico baixo, indica que o mestre pretende iniciar uma comunicação.

Os restantes dois fios são utilizados para a transferência da informação, um para cada sentido, sendo conhecidos como SDI (*Serial Data In*) e SDO (*Serial Data Out*) da perspectiva de cada um dos dispositivos. Os dados que saem do *master* pelo seu pino SDO entrarão no *slave* pelo seu pino SDI e vice-versa.

Após esta transferência, os dados recebidos ficam armazenados no registo SSPBUF (ou SPIxBUF, dependendo da família do microcontrolador), lido posteriormente por *software*. A escrita de um valor neste registo inicia a transferência de dados entre os dispositivos.

É ainda de salientar que alguns microcontroladores, principalmente aqueles com maior número de funcionalidades possuem modos alternativos de SPI, nomeadamente:

- Modo 16 bits: a comunicação é efetuada em grupos de 16 bits em vez de grupos de 8 bits. Este modo está disponível apenas em microcontroladores de 16 e 32 bits;
- Modo *Framed*: neste modo, o relógio encontra-se sempre presente, mesmo quando não se está a transmitir dados, e o sinal de *Chip Select* funciona como uma marcação de início para cada transmissão;
- Modo *Enhanced Buffer*: apresenta um *buffer* com um sistema FIFO (*First In, First Out*) de 8 níveis, o que permite a escrita de até 8 conjuntos de informação (8 bytes no modo *standard*, 16 bytes no modo de 16 bits) de forma sucessiva, sem necessidade de esperar pelo fim da transmissão;

Sendo este um módulo de *hardware*, a correta definição dos registos associados é de extrema importância, sendo necessário garantir que os módulos de todos os dispositivos estão configurados de forma compatível. Os *bits* com maior importância nesta compatibilização são:

- O *bit* CKP no registo SSPCON (ou SPIxCON), que define a polaridade do sinal de relógio;
- O *bit* CKE no registo SSPSTAT (ou SPIxSTAT), que define o *timing* de transmissão da informação através da definição da transição em que esta ocorre;
- O *bit* SMP no registo SSPSTAT (ou SPIxSTAT), que define o *timing* da amostragem na transmissão de cada *bit* de informação;
- Os *bits* de definição do modo *master* ou *slave*: os *bits* SSPM no registo SSPCON dos microcontroladores com módulos SSP (*Synchronous Serial Port*, que incluem SPI e I²C) ou o *bit* MSTEN no registo SPIxCON1 dos microcontroladores com módulos SPI dedicados.

Na Figura 4.4 apresentam-se os quatro modos possíveis para o sinal de relógio do SPI em função dos *bits* CKP e CKE, enquanto na Figura 4.5 se apresentam os dois modos possíveis para a amostragem do sinal digital enviado entre microcontroladores. A partir desta informação, e tendo em conta que as linhas a traço interrompido em ambas as figuras representam o mesmo instante temporal, verifica-se que esta definição se reveste de extrema importância, uma

vez que influenciam tanto a amostragem como os instantes de alteração de dados.

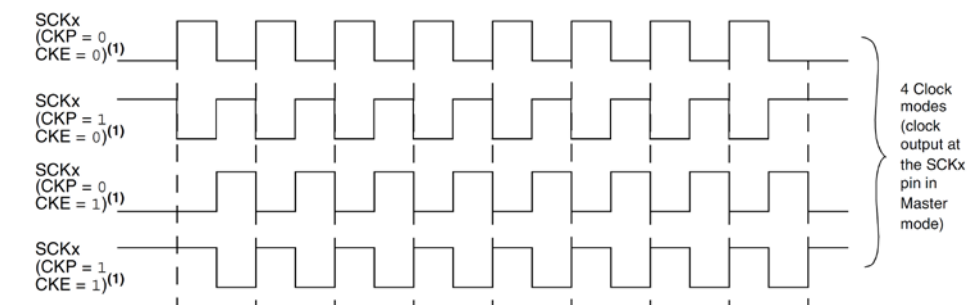


Figura 4.4 – Modos de relógio disponíveis para SPI, em função dos *bits* CKP e CKE [79]

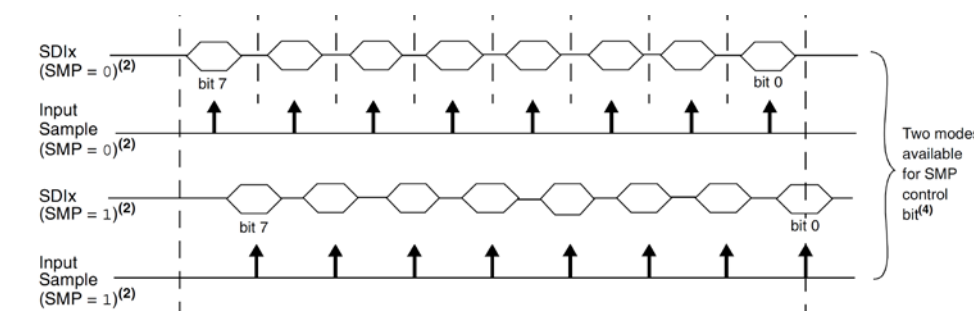


Figura 4.5 – Modos de amostragem disponíveis para SPI, em função do *bit* SMP [79]

Na Figura 4.6 apresenta-se o diagrama da evolução temporal de uma comunicação SPI com CKP=0, CKE=0 e SMP=0 num microcontrolador da família PIC24F. É de salientar que, assim que a transmissão de um *byte* é concluída, o *bit* SPIRBF (BF nos PIC18) toma o valor um, sendo feito o seu *reset* quando o *buffer* é lido. A *flag* de interrupção associada ao módulo, SPIxIF (SSPIF nos PIC18), tomará o valor um ao mesmo tempo que esta, embora o seu *reset* tenha de ser feito explicitamente no *software*. O *bit* SPITBF, apenas presente em microcontroladores que possuam dois *buffers* distintos, um para receção (*Serial Receive Buffer*) e outro para transmissão (*Serial Transmit Buffer*), tomará o valor um assim que o utilizador escrever no *buffer*, voltando a zero assim que se inicie a transmissão. Isto permite ao utilizador saber quando poderá introduzir novos dados no *buffer*, sem necessidade de esperar pelo fim da transmissão do *byte* anterior.

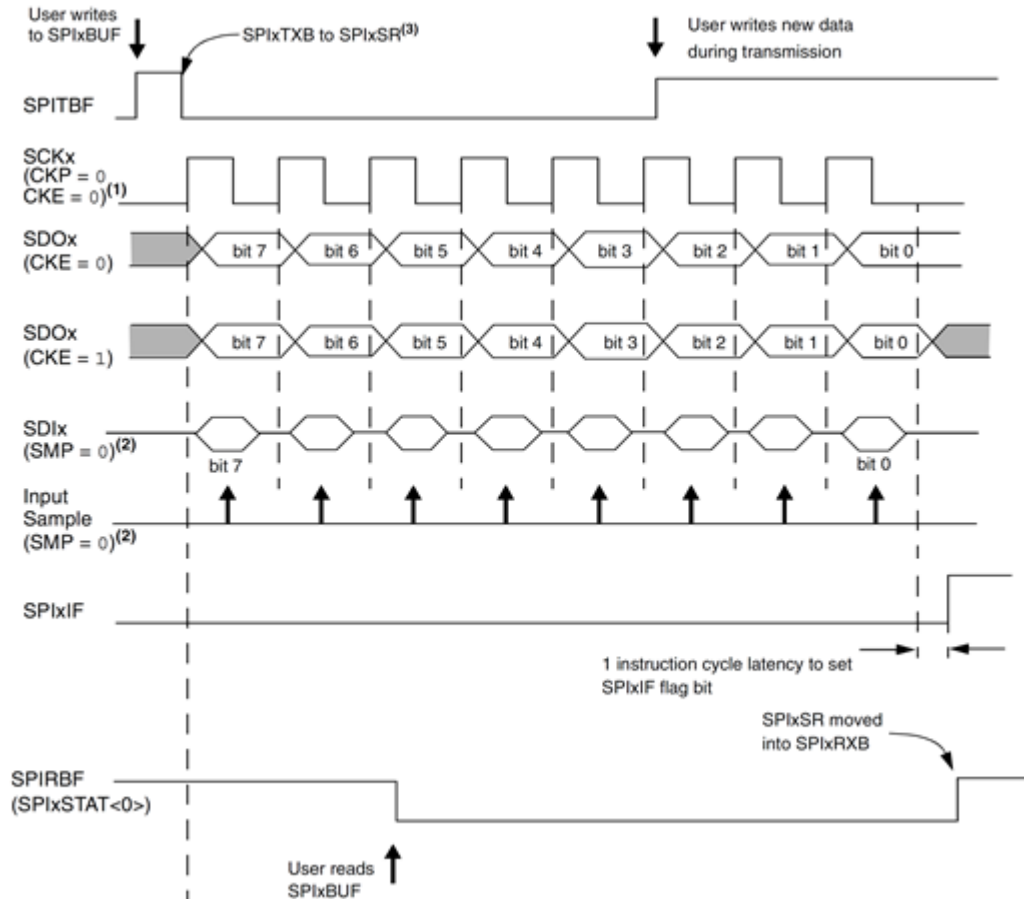


Figura 4.6 – Diagrama da evolução temporal de uma comunicação SPI num PIC24F [79]

4.1.2.1 Implementação

A comunicação SPI foi utilizada para realizar a interface entre microcontroladores, entre um microcontrolador e o circuito integrado de suporte ao termopar MAX31855K e entre um microcontrolador e a antena MiWi. Esta última interface apenas difere das restantes na medida em que o circuito integrado não possui um pino SDI, pelo que não poderá receber informações do microcontrolador, o que também não é necessário.

Este protocolo de comunicação poderá atingir, no máximo, taxas de transmissão de dados da ordem dos 20 Mbits/s. No entanto, nem todos os dispositivos compatíveis com este protocolo poderão atingir essa taxa. Para além disso, a taxa máxima que cada dispositivo suporta poderá não ser a mais indicada para a comunicação em questão, uma vez que uma taxa mais reduzida se traduz numa comunicação mais robusta. A implementação utilizada poderia

atingir um máximo de 8 Mbits/s, embora se tenha optado por utilizar uma taxa de 500kbits/s visto esta ser suficiente para a aplicação.

Na Figura 4.7 apresenta-se o diagrama de blocos do procedimento de comunicação SPI, válido tanto para o mestre como para o escravo para um *byte* individual. Repetindo este procedimento, poder-se-á enviar e receber um qualquer número de *bytes*.

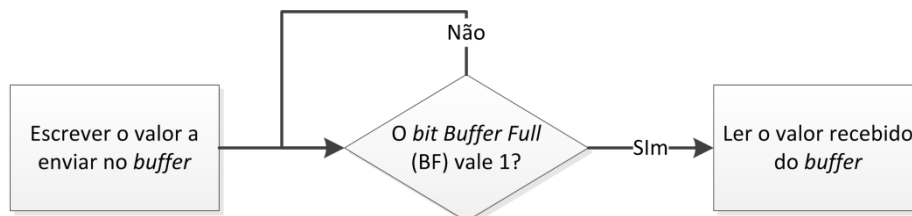


Figura 4.7 – Procedimento de comunicação SPI

É de salientar que, para este procedimento de comunicação funcionar, é necessário que ambos os microcontroladores estejam a executar a mesma lógica de comunicação ao mesmo tempo. Para tal, pode-se recorrer a interrupções geradas pelo módulo SPI do dispositivo escravo quando termina a transmissão do primeiro *byte*, seguindo o procedimento descrito no diagrama de blocos da Figura 4.8.

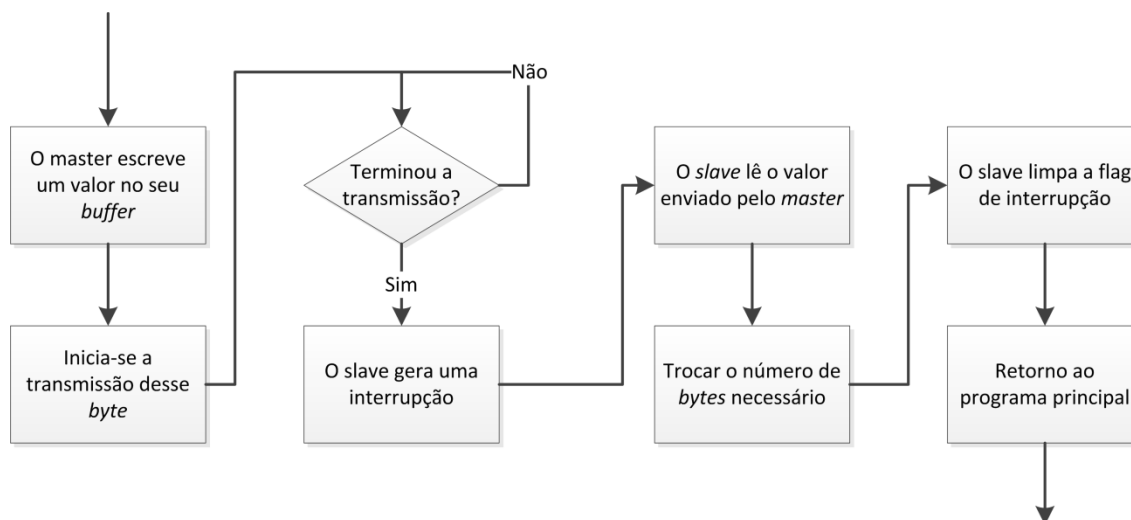


Figura 4.8 – Sincronização do mestre e do escravo para comunicação SPI

4.1.2.1.1 Transferência de dados por SPI

Verifica-se que para enviar qualquer tipo de informação é necessário dividi-la em *bytes*, juntando-a novamente do outro lado. Na Tabela 4.2 apresenta-se a

relação entre os tipos de dados mais frequentes e o número de *bytes* necessário para o representar.

Tabela 4.2 – Número de *bytes* para os tipos de dados mais comuns em C

Tipo de dados	Número de <i>bytes</i>
<i>char</i>	1
<i>int</i>	2
<i>long</i>	4
<i>float</i>	3 ou 4
<i>double</i>	8

A partir desta tabela é possível verificar que o envio de dados do tipo *char* é direto, não envolvendo qualquer conversão. Por seu lado, o envio de dados do tipo inteiro (*int*) implica a sua divisão em dois *bytes* distintos, que pode ser feita com recurso a *shifts* (operador \gg), ou seja, deslocando os *bits* para a direita de forma a estes ocuparem a localização do outro, como apresentado no diagrama de blocos da Figura 4.9. É de salientar que, para agrupar os bytes recebidos se faz o processo inverso, ou seja, *shift* para a esquerda de 8 *bits* do segundo *byte*, seguido de um *ou bit-a-bit* entre esse resultado e o primeiro *byte*. É necessário efetuar um *cast* do resultado desse *shift* para a esquerda numa variável temporária inteira de forma a não perder informação.



Figura 4.9 – Procedimento para envio e reconstrução de uma variável inteira

A transferência de uma variável do tipo *long* segue a mesma lógica e, sendo necessária a transferência de quatro *bytes*, o terceiro *byte* resulta de um *shift* de 16 bits e o quarto *byte* resulta de um *shift* de 24 bits da variável *long* original.

Para a transferência de variáveis do tipo *float* ou *double* não é possível utilizar este método. Uma alternativa passa por arredondar o valor da variável e converter para tipo *int* ou tipo *long*. No entanto, esse método perde uma grande quantidade de informação e poderá ter de ser revista individualmente para cada variável. Assim, para realizar esta transferência pode-se recorrer à utilização de *unions*.

Um *union* em C permite agrupar, no mesmo endereço de memória, várias variáveis de tipo de dados diferente. Assim, definindo um *union* entre uma variável *float* e um vetor *char* de três ou quatro elementos, dependendo da representação de *float* utilizada pelo compilador, é possível retirar os *bytes*

individuais que constituem o *float*, podendo ser enviadas por SPI de acordo com o diagrama de blocos da Figura 4.10 e reconstruídas no outro dispositivo de acordo com o diagrama de blocos da Figura 4.11.

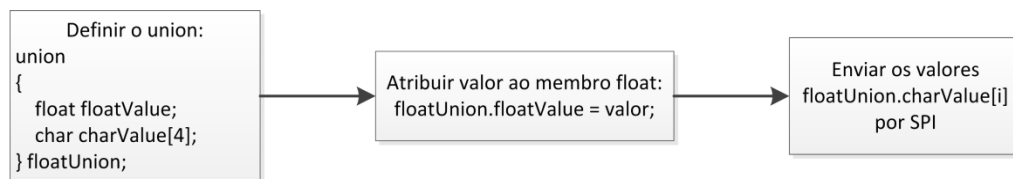


Figura 4.10 – Procedimento de envio de um *float* de quatro *bytes* por SPI utilizando um *union*

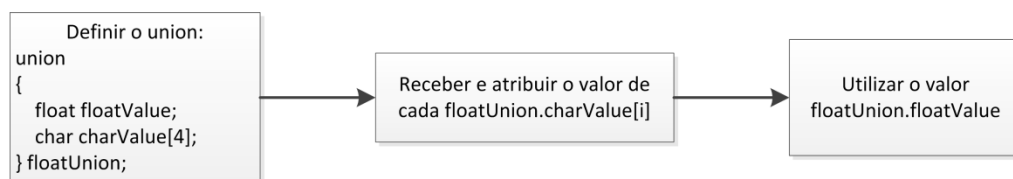


Figura 4.11 – Procedimento de recepção de um *float* de quatro *bytes* por SPI utilizando um *union*

A representação de uma variável *float* é uma variável de 3 *bytes* nos microcontroladores de 8-bits, enquanto que nos de 16-bits é uma variável de 4 *bytes*. Isto leva a que seja necessária uma conversão entre eles, para além da utilização do *union*.

Na Tabela 4.3 apresentam-se os dois formatos de *float* utilizados pela *Microchip* nos seus microcontroladores: o formato *Microchip* 32-bits e o formato *Microchip* 24-bits. Para além destes dois, existem outros formatos, sendo o mais comum o definido pela norma IEEE754.

Tabela 4.3 – Formatos de *float* da *Microchip* [85]

Formato	<i>eb</i>	<i>f0</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
Microchip 32-bit	×××× ××××	s××× ××××	×××× ××××	×××× ××××
Microchip 24-bit	×××× ××××	s××× ××××	×××× ××××	

Em ambos estes formatos, o primeiro *byte*, conhecido como *eb*, corresponde ao expoente que irá construir a variável, sendo os *bytes* restantes os correspondentes à mantissa, conhecida como *f*. O *bit s* traduz o sinal do *float*, sendo negativo quando igual a 1.

Para converter uma representação de 24-bits numa representação de 32-bits basta definir o último *byte*, ou seja, na nomenclatura da Figura 4.11,

floatUnion.charValue[0], como 0x00. Para a conversão inversa pode-se truncar ou arredondar de forma a remover o último *byte* [85].

4.1.2.1.2 Interligação com o módulo de sensores internos

O módulo de sensores internos não estará sempre disponível para comunicações, uma vez que a comunicação 1-wire com o sensor de humidade DHT22 exige a desativação global das interrupções. Isto faz com que existam três alternativas:

- O dispositivo mestre espere sempre o tempo suficiente para terminar a leitura do sensor;
- O módulo de sensores internos é configurado como dispositivo mestre;
- O mestre verifica se o módulo está com interrupções desativadas e salta a comunicação nesse caso.

A primeira opção não é a mais indicada, uma vez que bloqueia o microcontrolador principal durante demasiado tempo, impedindo-o de realizar outras funções importantes.

De entre as duas opções restantes, a preferência recaiu sobre a última, uma vez que o microcontrolador que controla o ecrã tátil possui outras interrupções geradas pela biblioteca gráfica, nomeadamente relativas ao toque, que podem afetar a comunicação no caso de ele não ser o mestre.

Caso o dispositivo escravo não leia o seu *buffer* após uma transmissão e o mestre tente comunicar novamente, o mestre receberá exatamente o valor que enviou e o dispositivo escravo definirá o valor do seu *bit* SSPOV (o *bit* indicador de *overflow* na receção) como 1. Assim, programando o dispositivo escravo para enviar sempre um *byte* constante distinto do enviado anteriormente pelo mestre, é possível verificar se o escravo está a comunicar corretamente. Na Figura 4.12 apresenta-se o diagrama de blocos relativo à lógica descrita para o dispositivo mestre e na Figura 4.13 apresenta-se o relativo à lógica descrita para o dispositivo escravo.

Assim, optou-se em todas as comunicações por enviar um valor constante, um *byte* de valor 0xBF, no início de cada comunicação, de forma a ser possível verificar se está a ser processada corretamente.

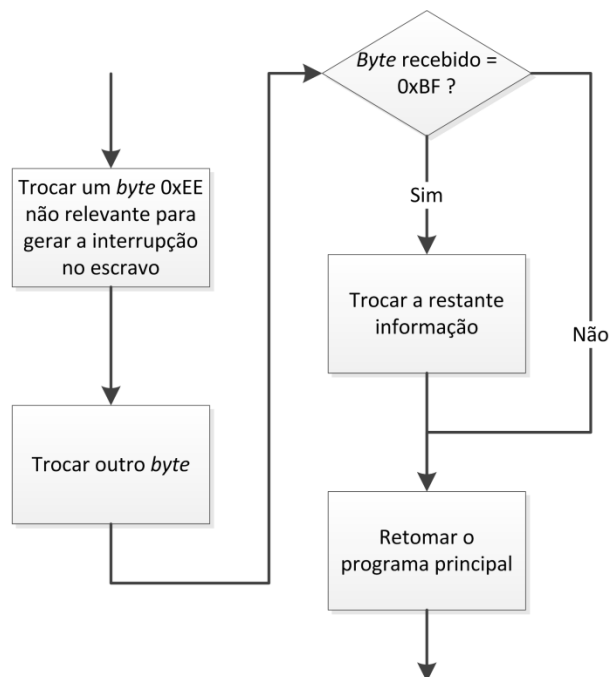


Figura 4.12 – Lógica de comunicação implementada no mestre do Módulo de sensores internos

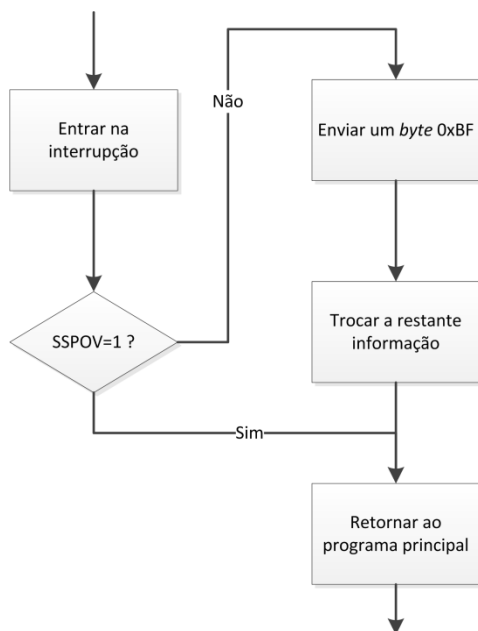


Figura 4.13 – Lógica de comunicação implementada no Módulo de sensores internos

4.1.2.1.3 Interligação com o circuito integrado de suporte ao termopar

A comunicação SPI utilizada por este circuito integrado (MAX31855) de interface com o termopar é em tudo semelhante à utilizada pelos restantes dispositivos, distinguindo-se apenas por ser a única comunicação implementada

de forma unidirecional. Deste modo, a programação desta é em tudo semelhante ao descrito anteriormente.

Este dispositivo envia um total de quatro *bytes*, que incluem o valor de 14 *bits* da temperatura compensada da junta quente do termopar, o valor de 12 *bits* da temperatura interna do circuito integrado e vários *bits* de detecção de falhas, como representado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Explicitação da informação contida nos *bytes* enviados pelo MAX31855 [67]

	14-BIT THERMOCOUPLE TEMPERATURE DATA				RES	FAULT BIT	12-BIT INTERNAL TEMPERATURE DATA				RES	SCV BIT	SCG BIT	OC BIT
BIT	D31	D30	...	D18	D17	D16	D15	D14	...	D4	D3	D2	D1	D0
VALUE	Sign	MSB 2 ¹⁰ (1024°C)	...	LSB 2 ⁻² (0.25°C)	Reserved	1 = Fault	Sign	MSB 2 ⁶ (64°C)	...	LSB 2 ⁻⁴ (0.0625°C)	Reserved	1 = Short to V _{CC}	1 = Short to GND	1 = Open Circuit

É de salientar que ambas as representações de temperatura são em complemento para dois, o método mais utilizado para a representação de números inteiros com sinal em sistemas computacionais, o que facilita a sua implementação.

Este circuito integrado deteta diversos tipos de falhas, cada uma marcada com o seu *bit* respetivo. O *bit* D0 traduz a situação de circuito aberto, ou seja, quando não deteta a presença de qualquer termopar. Os *bits* D1 e D2 traduzem curto-circuitos com o *ground* e a alimentação, respetivamente, e não devem ser ativados no produto final. O *bit* D16 está ativo sempre que qualquer um dos *bits* de falha restantes esteja ativo.

A conversão dos valores de temperatura de representações com sinal de 12 e 14 *bits* em inteiros com sinal foi feita através de *shifts*. Primeiro, um *shift* para a esquerda de 2 ou 4 *bits*, respetivamente, coloca o *bit* de sinal na sua posição. De seguida, um *shift* para a direita da mesma quantidade coloca o restante valor na posição correta. É de salientar que este método poderá não ser aplicável a todos os compiladores, uma vez que a forma como os *shifts* são tratados em variáveis com sinal pode variar dependendo do *hardware*.

4.1.3 Protocolo MiWi™

Neste sistema de monitorização, implementa-se comunicação sem fios MiWi na interface entre o módulo HMI e o módulo de sensor externo.

O *stack* de protocolos de comunicação sem fios MiWi™ da *Microchip* é um protocolo simples desenhado para baixa taxa de transferência de dados, curta distância e baixo custo. Este protocolo é baseado fundamentalmente no protocolo IEEE 802.15.4™ e tem como alvo aplicações de pequenas dimensões, com poucas ligações [86]. Para além disso, este *stack* é um agregado de três protocolos, conhecidos como:

- MiWi™ P2P;
- MiWi™;
- MiWi™ PRO.

Qualquer um destes protocolos utiliza a interface MiMAC para comunicar com os transceptores da *Microchip* e a interface MiApp para interagir com a aplicação de utilizador, sendo possível utilizá-los com diferentes famílias de microcontroladores da *Microchip*. Tendo em conta que estes protocolos são proprietários, a implementação de qualquer um destes protocolos será sempre baseada nestas interfaces.

As principais diferenças entre estes protocolos são as topologias de rede suportadas por cada um, bem como o número máximo de dispositivos suportados.

4.1.3.1 MiWi™ P2P

O protocolo MiWi™ P2P é o mais simples dos protocolos da *stack* MiWi, suportando apenas topologias ponto-a-ponto (*peer-to-peer*) ou em estrela, estando esta última representada na Figura 4.14. Como se pode verificar pela representação, este protocolo não tem funcionalidades de encaminhamento (*routing*), ou seja, os pacotes enviados por um dispositivo não podem ser reencaminhados por outros dispositivos até ao seu destino, o que faz com que a mensagem só possa ser entregue dentro do alcance do sinal rádio do dispositivo transmissor.

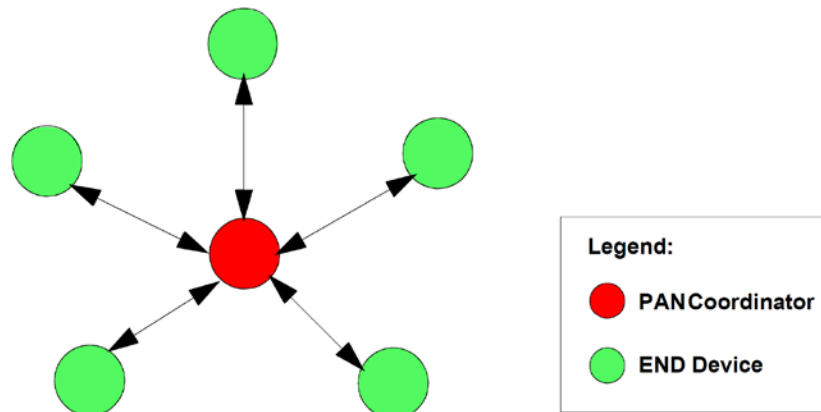


Figura 4.14 – Topologia de rede em estrela utilizada pelo protocolo MiWi™ P2P [87]

A principal vantagem deste protocolo é a sua simplicidade, principalmente devida ao facto de o dispositivo não ter de incluir rotinas de encaminhamento complexas. Por outro lado, a sua principal desvantagem é o seu alcance, embora possa ser aumentado. Mesmo assim, a partir de certo ponto será necessário recorrer a outro protocolo [87]. Para aumentar esse alcance pode-se, por exemplo, alterar a antena utilizada. No caso do sistema utilizado, a antena MRF24J40MA poderia em caso de necessidade ser substituída por outras antenas da mesma família com maior potência, nomeadamente as antenas MRF24J40MB e MRF24J40MC.

Para a aplicação em desenvolvimento, este protocolo é o mais indicado uma vez que o sistema inclui um número reduzido de pontos fisicamente próximos e que este protocolo apresenta um menor requisito de poder computacional do que os restantes.

4.1.3.2 MiWi™

O protocolo MiWi™ foi desenhado para alargar o alcance da rede disponibilizando funcionalidades de encaminhamento para uma pequena rede, de até 8 nós coordenadores, incluindo o coordenador PAN (*Personal Area Network*), aquele que inicia a rede. A sua topologia está representada na Figura 4.15, na qual se pode verificar que cada coordenador apenas se pode ligar a dispositivos finais (*end device*) ou ao coordenador PAN, não podendo ligar-se a outro coordenador. Esta característica faz com que exista um máximo de dois saltos (*hops*) entre um dispositivo final e o coordenador PAN, ou seja, quatro saltos entre dois dispositivos finais [87].

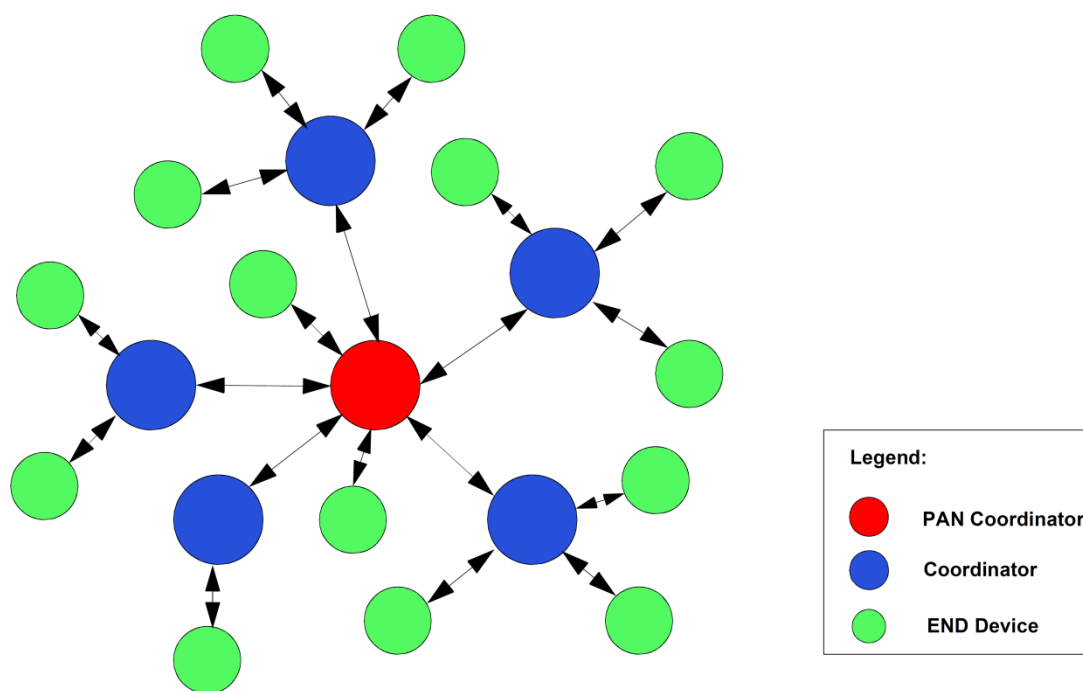


Figura 4.15 – Topologia de rede utilizada pelo protocolo MiWi™ [87]

Quando um coordenador se tenta ligar a uma rede já preenchida com oito coordenadores ou quando não consegue ligação ao coordenador PAN, poderá sempre juntar-se à rede como dispositivo final [87].

4.1.3.3 MiWi™ PRO

O protocolo MiWi™ PRO possui um mecanismo de encaminhamento melhorado, que permite suportar até 64 coordenadores, permitindo também a ligação entre dois coordenadores. Na Figura 4.16 apresenta-se a topologia característica destas redes, na qual se pode verificar que se pode formar uma topologia em linha, na qual se pode atingir 65 saltos entre dois dispositivos finais ou 64 saltos entre um dispositivo final e o coordenador PAN [87].

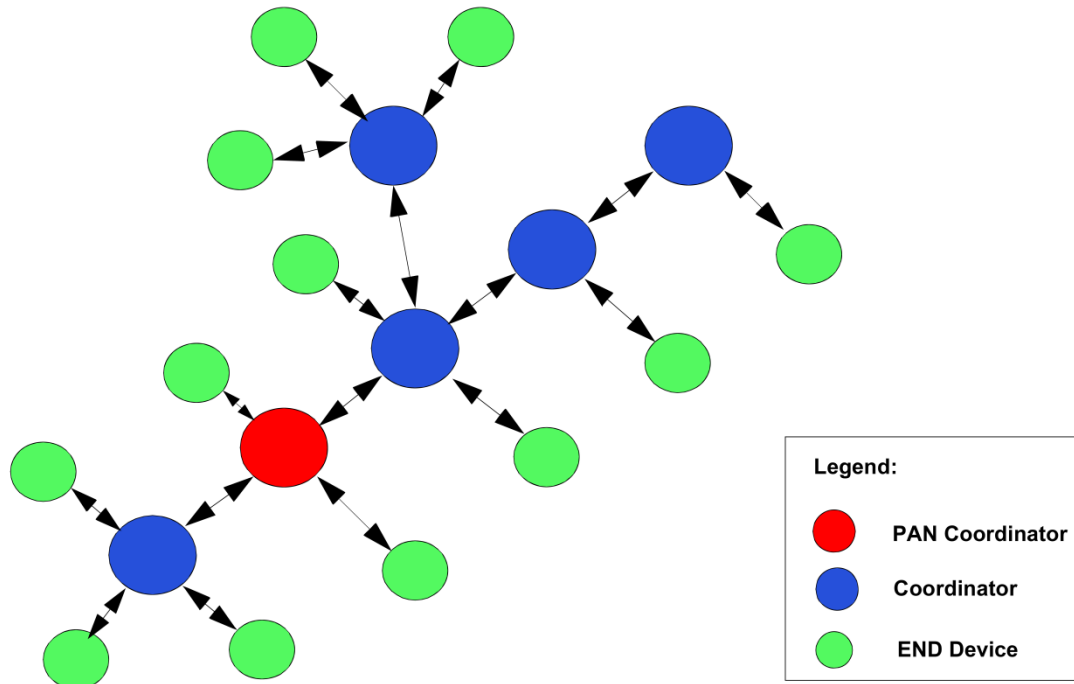


Figura 4.16 – Topologia de rede utilizada pelo protocolo MiWi™ PRO [87]

4.1.3.4 Especificação MiApp

A especificação MiApp define a interface de programação entre a aplicação do utilizador e o protocolo sem fios proprietário da *Microchip*. Esta interface está implementada de duas formas principais: parâmetros de configuração definidos no ficheiro de configuração e um conjunto de funções de interligação com os protocolos de comunicação da *Microchip*. Como referido anteriormente, utilizando esta interface, as aplicações podem utilizar qualquer um dos protocolos de comunicação sem fios MiWi e, com poucas alterações na aplicação, trocar de protocolo entre os três possíveis. [88]

Na Figura 4.17 apresenta-se o diagrama de blocos relativo à configuração do *stack* MiWi, utilizando o MiApp e o MiMAC. Através desta, é possível verificar a permutabilidade tanto de protocolos de comunicação como de transceptores RF.

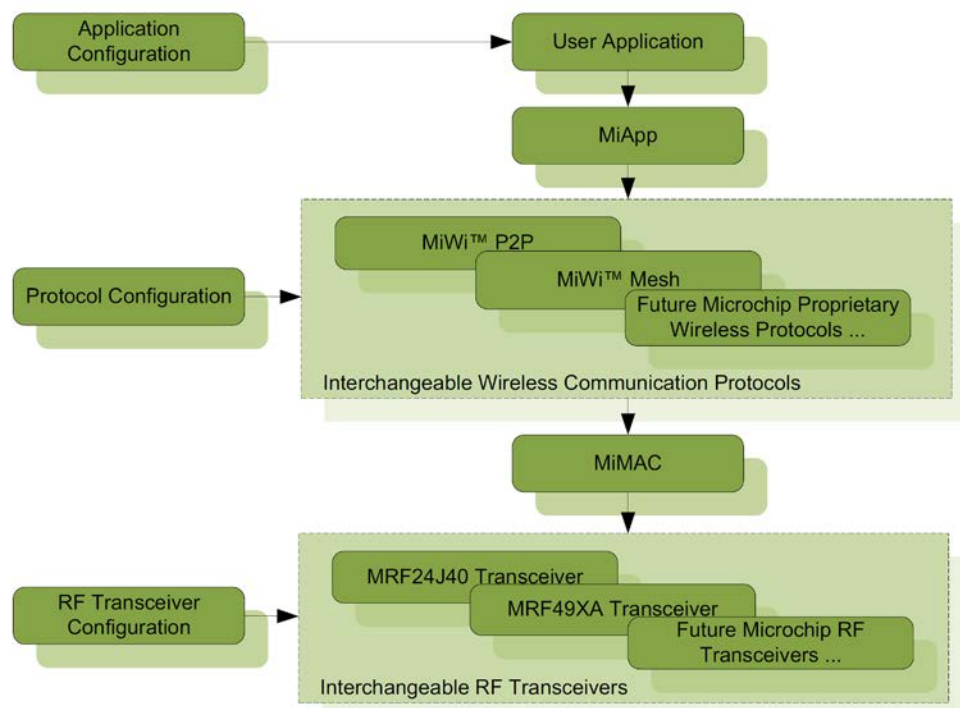


Figura 4.17 – Diagrama de blocos do *stack* MiWi [88]

Os ficheiros de configuração contêm parâmetros que devem ser definidos antes da compilação, pelo que se recorre à utilização de diretivas do pré-processor, nomeadamente definições (*#define*). Nestes ficheiros, são incluídos dois tipos de definições principais:

- Definições de *hardware*: incluindo definição de pinos, recursos de *hardware* e de periféricos do microcontrolador;
- Definições de *software*: controlam as secções de código que são compiladas para o ficheiro de *firmware*, selecionando tanto o protocolo e o transceptor a utilizar como as funcionalidades que são suportadas.

A especificação MiApp inclui diversas interfaces, normalmente divididas em cinco categorias, que podem ser utilizadas pelo programador para gerir a comunicação entre o seu dispositivo e a rede:

- Interface de inicialização: inicializa o protocolo que foi selecionado;
- Interface de *hand-shake*: permite que os diferentes nós descubram a rede e se liguem a esta ou que iniciem uma nova rede;
- Interfaces de envio de mensagens: permitem transmitir informação para um ou mais dispositivos;
- Interfaces de receção de mensagens: permitem receber informação proveniente de outros dispositivos;
- Interfaces adicionais: permitem ativar funcionalidades de controlo de ruído e poupança de energia, entre outras.

4.1.3.5 Implementação

A comunicação MiWi que se utiliza neste sistema é do tipo unidirecional, uma vez que apenas se pretende enviar o valor calculado da corrente (I_{RMS}) para o microcontrolador principal localizado no módulo HMI e não se pretende enviar valores no sentido contrário.

Assim, na Figura 4.18 apresenta-se o diagrama de blocos da lógica de envio de informações por MiWi. É de salientar que, no início de cada mensagem, se envia um *byte* de valor constante, 0xBF, para ser possível verificar se a comunicação se está a processar corretamente ou não. Para além disso, também é importante verificar que, durante o tempo de espera entre duas mensagens, o microcontrolador calcula o novo valor a enviar.

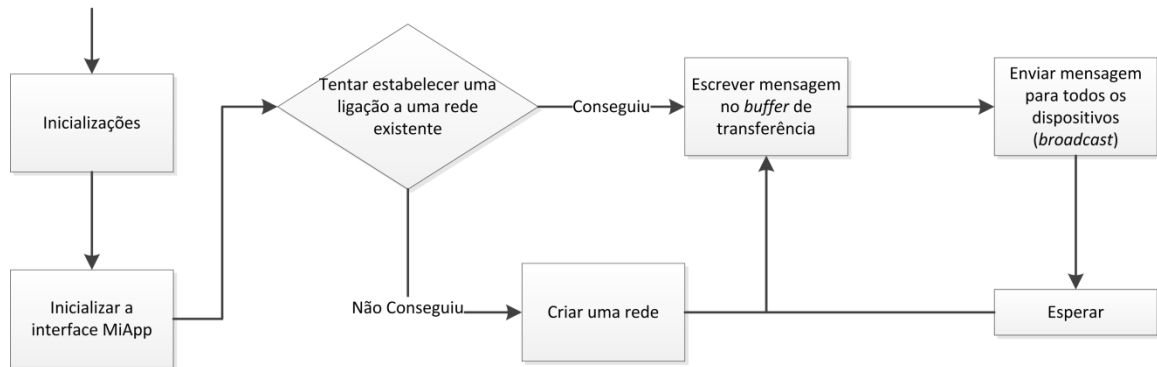


Figura 4.18 – Lógica de envio de informações por MiWi implementada no microcontrolador de interface com o sensor de corrente

Na Figura 4.19 apresenta-se o diagrama de blocos relativo à lógica de receção de informações por MiWi. Não se inclui neste microcontrolador a funcionalidade de criar uma nova rede, uma vez que essa criação está a cargo do outro microcontrolador.

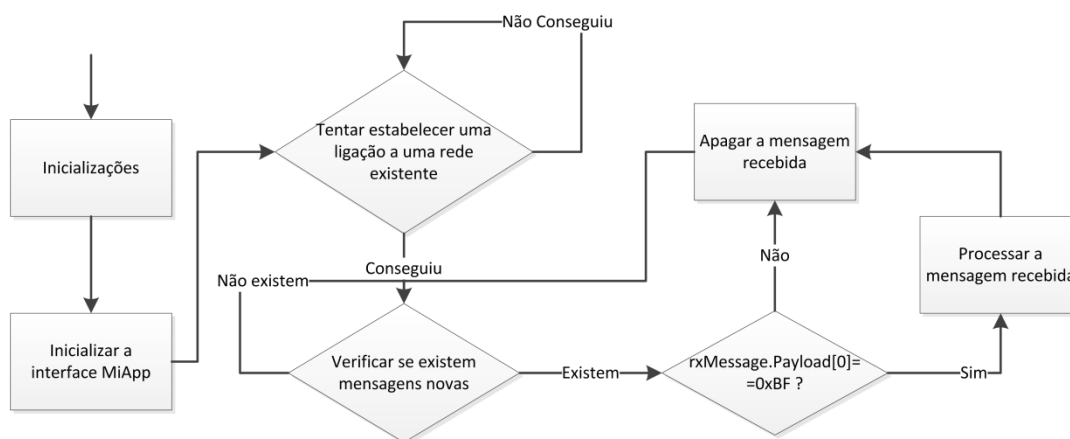


Figura 4.19 – Lógica de receção de informações por MiWi implementada no microcontrolador MiWi do ecrã tátil

Nesta implementação, os pacotes são enviados no canal 19 por *broadcast*, isto é, para todos os dispositivos, e sem encriptação, ou seja, podem ser lidos sem ser necessário ter uma chave. No entanto, caso se pretenda restringir esta ligação, pode-se utilizar o *unicast*, isto é, envio para apenas um dispositivo, com encriptação.

Utilizando tanto *broadcast* como *unicast*, é possível ao microcontrolador recetor verificar qual o dispositivo que lhe enviou a mensagem.

Se se pretender utilizar este sistema em aplicações críticas nas quais existe o risco de *hack*, deve ser utilizado tanto o *unicast* com uma encriptação forte como uma verificação do dispositivo fonte da informação.

Para estas implementações da interface MiApp foram seguidos os passos descritos em [88], complementados pelas demonstrações disponibilizadas pela *Microchip*.

4.2 Estratégia de leitura dos sensores internos

A comunicação com o sensor de humidade e temperatura DHT22 está limitada a uma periodicidade de 2 segundos. No entanto, uma maior frequência pode ser interessante para a avaliação da abertura da porta e para a temperatura. Deste modo, incluindo-se um atraso de 50 ms no ciclo principal, é garantido que ao fim de 40 destes ciclos já tenham decorrido 2 segundos, uma vez que as restantes rotinas também levam tempo a correr. A Figura 4.20 apresenta a lógica do ciclo principal do microcontrolador PIC18F26J50.

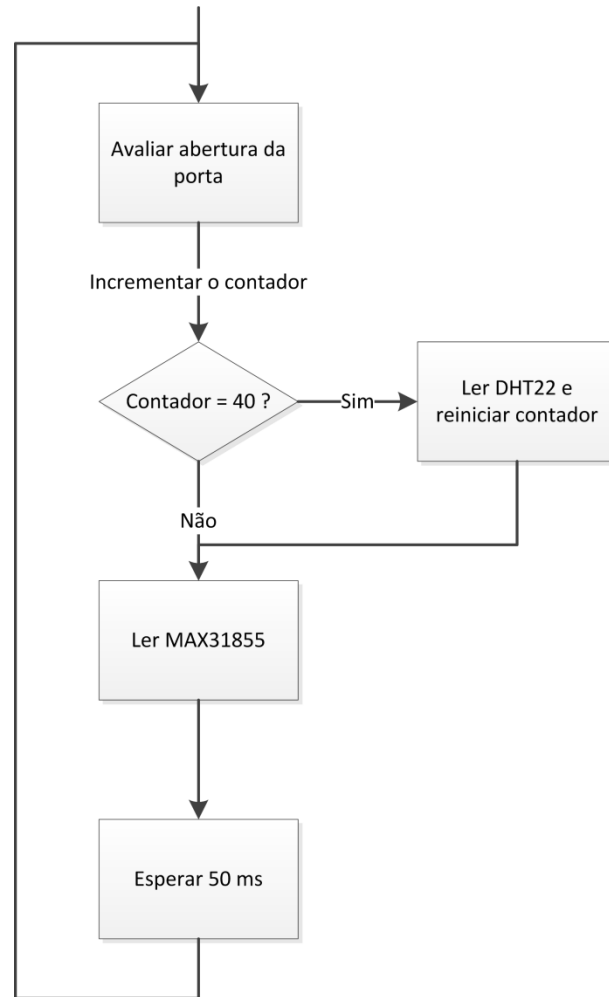


Figura 4.20 – Ciclo principal do microcontrolador de interface com os sensores internos

Para a verificação do estado da porta definiu-se uma variável booleana que toma o valor 1 quando a porta se encontra aberta e o valor 0 quando fechada. Assim, torna-se necessário definir em que condições se considera que a porta estará aberta ou fechada. Estas condições dependem da montagem do sistema na câmara frigorífica, sendo definidas especificamente para uma posição de montagem do sensor, para uma distância mínima entre este e o íman e para uma determinada intensidade do campo do íman. As únicas alterações a efetuar na programação do microcontrolador são os valores de *set* e *reset*, definidos num ficheiro de configuração através de comandos do pré-processador (*#define*) e, caso se altere o posicionamento do sensor, a polaridade.

Na Figura 4.21 apresenta-se a lógica de definição da variável associada, que pode ser facilmente adaptada para, em vez da deteção do estado de abertura, detetar o ângulo de abertura da porta, sendo para isso necessário apenas efetuar uma caracterização da relação entre o sinal do sensor e o ângulo de abertura.

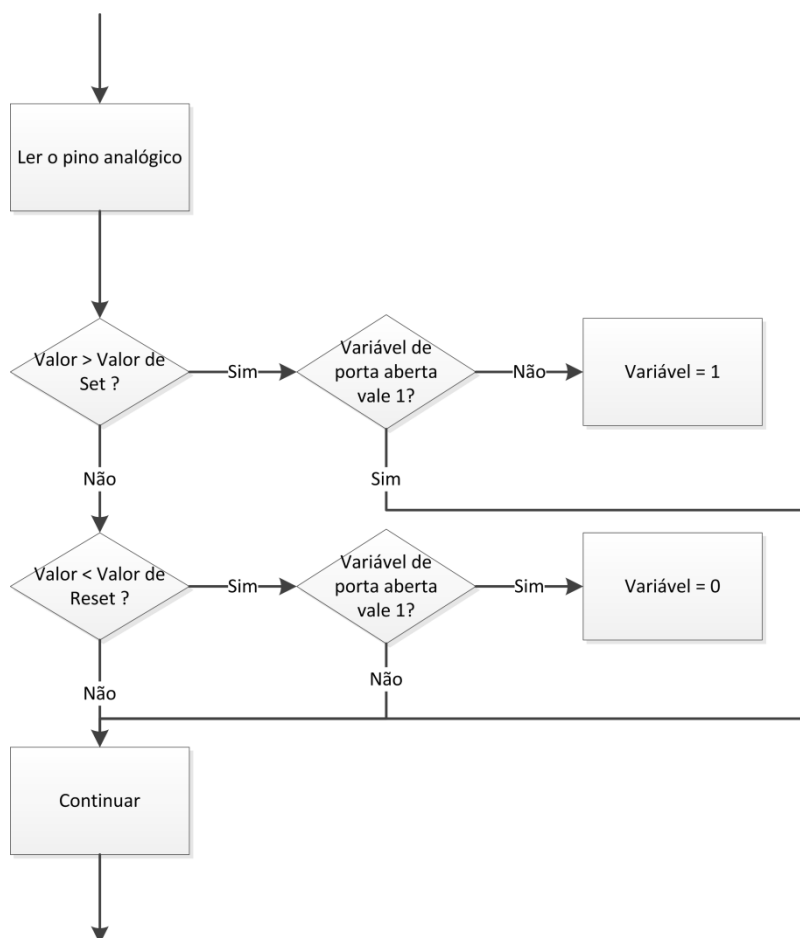


Figura 4.21 – Lógica de definição da variável de estado da abertura da porta

4.3 Estratégia de cálculo do consumo energético

O cálculo da potência real é feito a partir da aproximação $P = V_{RMS} I_{RMS} PF$. Tendo em conta que a tensão RMS é constante e que o fator de potência é definido pelo utilizador do sistema, apenas é necessário efetuar o cálculo da corrente RMS. A partir desses três valores, o microcontrolador central do módulo HMI calcula o valor instantâneo da potência e apresenta-o ao utilizador.

O cálculo do valor RMS de corrente implica a amostragem de diversos pontos num ciclo cuja frequência é de 50Hz, em Portugal. Assim, para ser possível obter uma boa representação da onda em questão, é necessário que a frequência de amostragem seja cerca de 10 vezes superior à frequência fundamental desta. Assim, foi definido obter 20 amostras por ciclo, o que se traduz num período de amostragem de 1 ms.

Desta forma, foi necessário recorrer a um temporizador. No microcontrolador utilizado, o PIC24FJ128GA010, cada temporizador possui um registo de período

associado que define o ponto em que se dá a reinicialização. A frequência de entrada no temporizador é definida como a frequência do oscilador F_{osc} a dividir por dois, ou seja, a frequência do ciclo máquina, F_{cy} . Esta frequência traduz o número de operações que o processador do microcontrolador consegue completar num segundo.

O período do temporizador em segundos é definido como $\frac{1}{F_{cy}} \cdot (PR + 1)$, sendo PR o valor do registo do período. Tendo em conta que, para um oscilador de 8MHz:

$$F_{cy} = \frac{F_{osc}}{2} = 4\,000\,000\text{ Hz} \quad (6)$$

Obtém-se que:

$$PR = \frac{1 \times 10^{-3}}{1/4\,000\,000} - 1 = 3999 \quad (7)$$

Para além da reinicialização por *hardware*, também é possível forçar essa reinicialização por *software*. Para definir se se deve reinicializar por *software* no final de uma medição é necessário definir-se se se pretende que decorra 1 ms entre o início de duas medições sucessivas ou se se pretende que decorra 1 ms entre o fim de uma e o início da seguinte. Nesta aplicação, o mais indicado é o primeiro caso, pelo que não se deve reinicializar o temporizador por *software* no final de uma medição. Desta forma, apenas será necessário limpar a *flag* de interrupção, o que permite ao microcontrolador realizar outras tarefas entretanto.

A lógica de amostragem do sensor de corrente é apresentada na Figura 4.22.

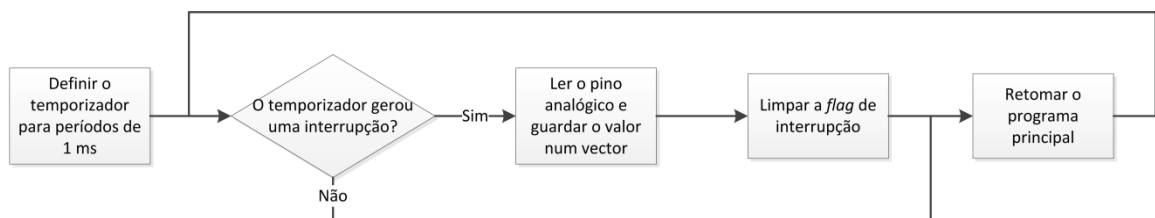


Figura 4.22 – Lógica de amostragem do sensor de corrente

É de salientar que, no *software* desenvolvido, é possível definir o número de amostras em cada vetor alterando um comando do pré-processador (*#define*), o que faz com que não seja necessário procurar as linhas de código específicas para

alargar ou reduzir a janela de amostragem. Por defeito, esta janela está definida para 5 ciclos, ou seja, 100 amostras.

Para evitar efetuar cálculos sobre um vetor em constante alteração sempre que se calcula o valor RMS da corrente, optou-se por copiar o vetor de amostras para um vetor temporário.

Os valores provenientes do conversor A/D são posteriormente convertidos em valores de tensão, de forma a ser possível compará-los com a característica definida para o sensor.

O valor central apresentado pelo sensor de corrente desenvolvido varia ligeiramente, embora apresente uma amplitude de variação proporcional à corrente alterna que o atravessa. Assim, e tendo em conta que a corrente deverá variar de forma simétrica em torno de zero, optou-se por, numa primeira abordagem, calcular esse valor central por *software*.

Como a característica do sensor de corrente foi definida de tensão RMS para corrente RMS, torna-se necessário calcular o valor RMS da tensão. Uma possível alternativa pode ser a definição da característica através dos valores de pico, mas foi preterida devido a ser consideravelmente mais suscetível ao ruído.

Na Figura 4.23 apresenta-se o diagrama de blocos que representa a lógica de cálculo do valor RMS da corrente.

Tendo em conta que qualquer cálculo com variáveis do tipo *float* leva um tempo consideravelmente maior que o mesmo cálculo com variáveis inteiras e que basta obter o valor de corrente RMS arredondado à unidade de mA, optou-se por implementar um método de cálculo da raiz quadrada distinto do método disponibilizado na biblioteca *standard* da linguagem C. Este método tem como entrada um valor do tipo *long* e como saída um valor do tipo *inteiro*.

Na Figura 4.24 apresenta-se o diagrama de blocos do método apresentado pela *Microchip* em [89]. Neste, começa-se com uma aproximação inicial igual ao número binário 0b10000000 (hexadecimal 0x80). De seguida, calcula-se o valor do seu quadrado. Se o valor obtido for menor que o argumento, inicia-se um novo bit, mantendo o anterior. No caso contrário, faz-se um *shift* do último *bit* introduzido para a direita. Seguindo este processo de forma cíclica até ao último bit, é possível obter uma boa aproximação inteira à raiz quadrada de um número.

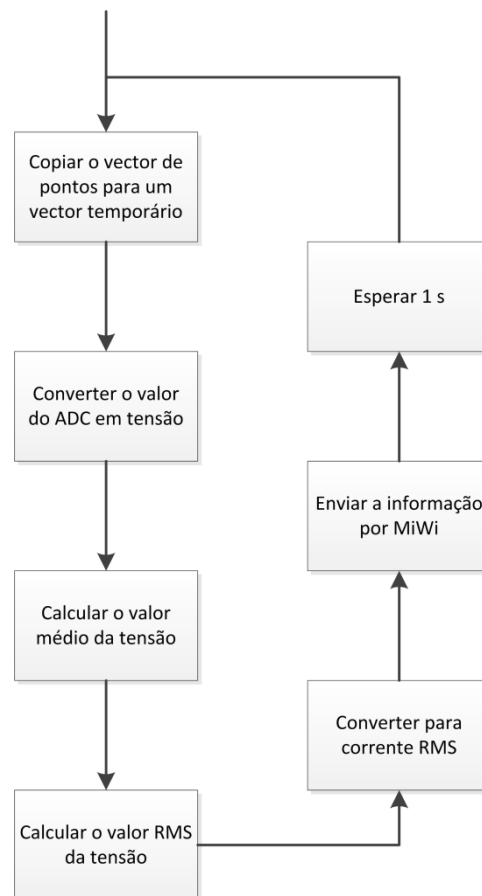


Figura 4.23 – Diagrama de blocos relativo à lógica de cálculo do valor RMS da corrente

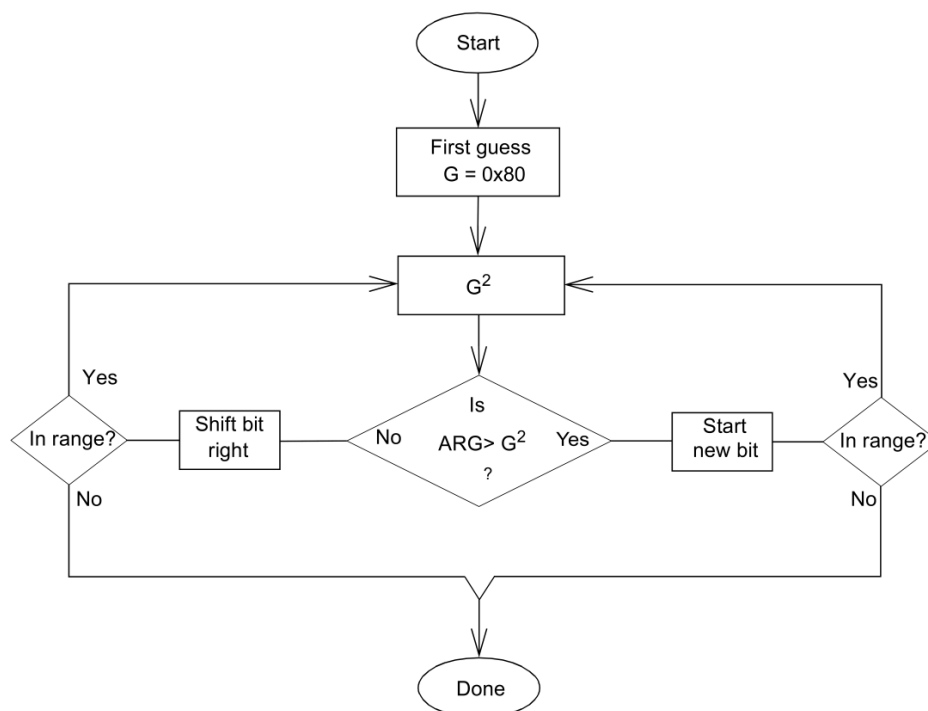


Figura 4.24 – Diagrama de blocos representativo do método de cálculo da aproximação inteira da raiz quadrada [89]

4.4 Interface Gráfica

O desenvolvimento da interface gráfica foi efetuado no GDD X (*Graphics Display Designer X*), tendo sido utilizado o sistema de desenvolvimento providenciado por esta ferramenta.

Este sistema de desenvolvimento inclui todo o código necessário à gestão de eventos e à interface com o ecrã tátil. Para comunicar com o controlador gráfico do ecrã, a biblioteca utiliza *drivers* fornecidos pela *Sagitron*, a representante da *Microchip* e da *Microtips* em Portugal. Verificou-se que a versão dos *drivers* utilizada define o pino de controlo da luz de retroiluminação como RD0 quando as ligações físicas são para o pino RC3, o que causava problemas quando se pretendia utilizar o pino RD0 para outras funções, nomeadamente comunicação SPI, pelo que foi necessário alterar esta associação nos *drivers*.

O GDDX permite o desenvolvimento rápido de interfaces gráficas e inclui um elevado número de funcionalidades. No entanto, não suporta várias das funções da biblioteca na qual se baseia, como por exemplo, caracteres especiais. Estes caracteres podem ser utilizados definindo o tipo de dados XCHAR como multi-byte, o que, para além de duplicar as necessidades de memória para o texto, introduz a necessidade de conversão do texto gerado pelo GDDX. Assim, foi tomada a decisão de não utilizar caracteres especiais.

No que toca à deteção de toque, a biblioteca da *Microchip* refere que reduzindo o valor definido como TOUCHSCREEN_RESISTIVE_PRESS_THRESHOLD a pressão que é necessário aplicar no ecrã diminui. No entanto, verificou-se após a realização de diversos testes que reduzindo esse valor, a pressão teria de aumentar. O programa desenvolvido teve em conta esta particularidade de funcionamento detetada.

Na Figura 4.25 apresenta-se a estrutura da biblioteca gráfica da *Microchip*, sendo possível verificar que existe uma interligação entre os diferentes componentes e que a aplicação do utilizador (*Application Layer*) pode utilizar funcionalidades de todos os níveis da biblioteca.

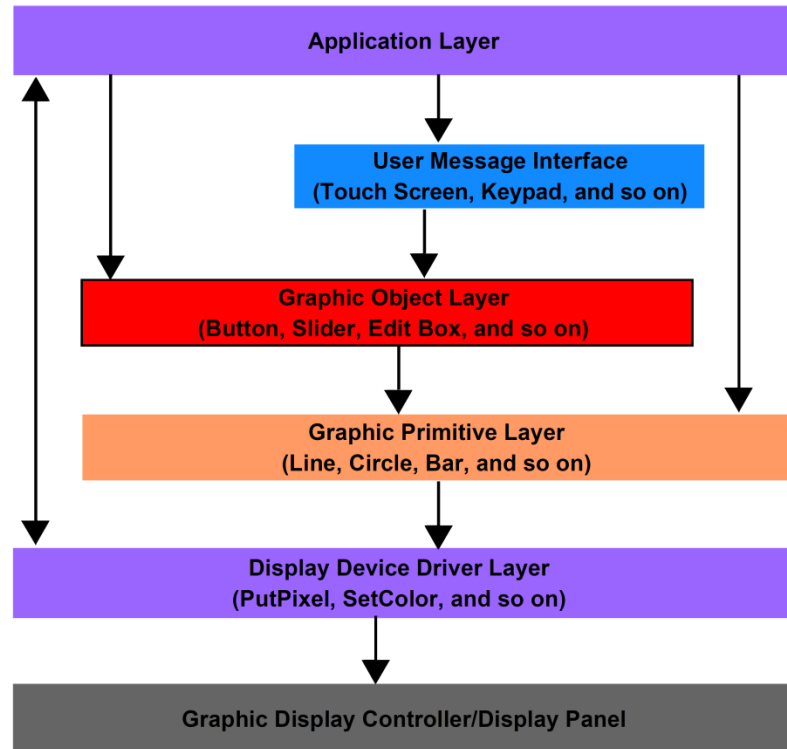


Figura 4.25 – Estrutura da biblioteca gráfica da *Microchip* [69]

O nível mais baixo da biblioteca, o *driver* do controlador gráfico, define a forma de comunicação que deve ser utilizada entre este e o microcontrolador, definindo também as funcionalidades mais básicas da biblioteca, tais como a colocação de um determinado pixel (*PutPixel()*) e a definição da cor a utilizar (*SetColor()*).

O nível seguinte, o *Graphic Primitive Layer*, define os elementos primitivos que podem ser utilizados, nomeadamente linhas, círculos e texto.

Estas funcionalidades podem ser utilizadas para construir objetos como botões e gráficos, alguns dos quais já se encontram definidos na *Graphic Object Layer*, podendo ser expandida pelo utilizador.

O último nível da biblioteca, a *User Message Interface*, define os procedimentos de deteção do toque e permite determinar em que objeto é que o utilizador tocou, permitindo gerar as ações apropriadas.

Na Figura 4.26 apresenta-se a estrutura utilizada na implementação da biblioteca gráfica e da biblioteca USB no contexto do programa principal do microcontrolador.

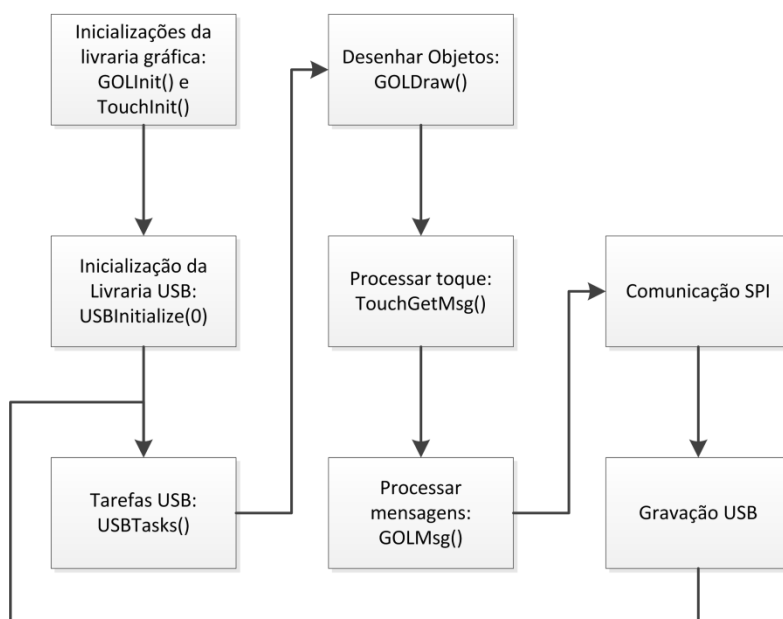


Figura 4.26 – Estrutura de implementação das bibliotecas gráfica e USB, no contexto do programa principal do microcontrolador

No que toca às funções de inicialização, a função *GOLInit()* chama por sua vez as funções *InitGraph()*, que inicia a ligação ao controlador do ecrã tátil, e *GolCreateScheme()*, que define os esquemas de cores e o tipo de letra definidos por defeito. Por seu lado, a função *TouchInit()* inicia a rotina de calibração no caso de não existirem dados registados na memória flash.

As funções *GOLDraw()* e *GOLMsg()* chamam durante a sua execução as funções *GOLDrawCallback()* e *GOLMsgCallback()*, que podem ser editadas pelo utilizador de forma a ser possível adicionar rotinas de desenho ou de gestão de determinados eventos, respetivamente. A função *GOLMsgCallback()* também é responsável por chamar as ações definidas no GDDX para os objetos, definidas na função *GDDDemoGOLMsgCallback()*.

A função *USBInitialize(0)* chama, nesta implementação específica, a função *USBHostInit(0)*, que inicia o suporte para comunicação USB em modo *host*. A função *USBTasks()* é responsável pela manutenção da ligação USB ao dispositivo.

Durante o desenvolvimento destas interfaces, a *Microchip* lançou uma nova versão do GDDX com um maior número de funcionalidades. No entanto, esta é baseada nas novas bibliotecas *MPLAB Harmony* que apenas se encontram disponíveis para microcontroladores de 32 *bits*, pelo que não foi utilizada.

A interface gráfica desenvolvida é constituída por diversos ecrãs interligados de uma forma estruturada que podem ser acedidos através de toque em botões, imagens ou caixas de texto. Na Figura 4.27 apresentam-se esses ecrãs bem como

o modo como estes se encontram interligados. É de salientar que a maioria destes ecrãs inclui conteúdo dinâmico, ou seja, altera o valor de vários dos seus elementos em função do estado atual da câmara frigorífica. Os ecrãs dos gráficos são exemplos claros deste facto, uma vez que apenas a unidade do eixo vertical do gráfico e os atalhos são apresentados de forma estática.

Para a apresentação destes gráficos seguiu-se uma adaptação do procedimento utilizado pela *Microchip* nos seus programas de demonstração. As adaptações introduzidas permitiram memorizar valores enquanto o utilizador não se encontra a visualizar o gráfico, sem introduzir perda de *performance*. Este procedimento segue os passos definidos no diagrama de blocos da Figura 4.28. A aquisição de novos dados leva a um deslocamento do gráfico para a esquerda, um *pixel* de cada vez, permitindo gerar um gráfico com evolução temporal.

Após a calibração, se esta tiver sido necessária, a interface inicia-se pelo “Ecrã Inicial”, no qual se apresentam diversas informações acerca do trabalho realizado, ou seja, o seu título, o nome do autor e dos orientadores e a instituição de ensino onde foi realizado.

Para prosseguir, é necessário tocar em qualquer região do ecrã, entrando-se assim no ecrã do “Menu Principal”. Neste, é possível selecionar uma de duas alternativas, visualizar o estado atual ou alterar definições.

Caso o utilizador escolha seguir para o ecrã de “Definições”, o utilizador pode definir tanto o valor do fator de potência como os limites (superior e inferior) a utilizar com os alarmes de temperatura. Estes alarmes são gerados quando a temperatura sai da gama de variação permissível, definida através de um valor máximo e um valor mínimo neste ecrã. Para além disso, pode optar por entrar noutro ecrã, o ecrã de “*Debug*” (depuração).

Neste ecrã, o utilizador pode ver os valores que estão a ser recebidos dos sensores, bem como diversas variáveis de verificação que permitem detetar qualquer problema com os sensores ou com a comunicação MiWi.

Caso o utilizador opte por seguir para o “Estado Atual” a partir do “Menu Principal”, vai encontrar uma interface que apresenta os valores de temperatura, humidade relativa e potência atualizados com um período de 1 segundo. Para além disso, é possível ver o estado de abertura da porta através de um indicador colorido que troca entre verde e vermelho quando a porta está fechada ou aberta, respetivamente, e visualizar e alterar o estado de gravação USB. Caso o utilizador pretenda alterar este estado, as informações relevantes são mostradas recorrendo aos elementos primitivos da biblioteca gráfica e não através de objetos, seguindo a lógica representada no diagrama de blocos da Figura 4.29.

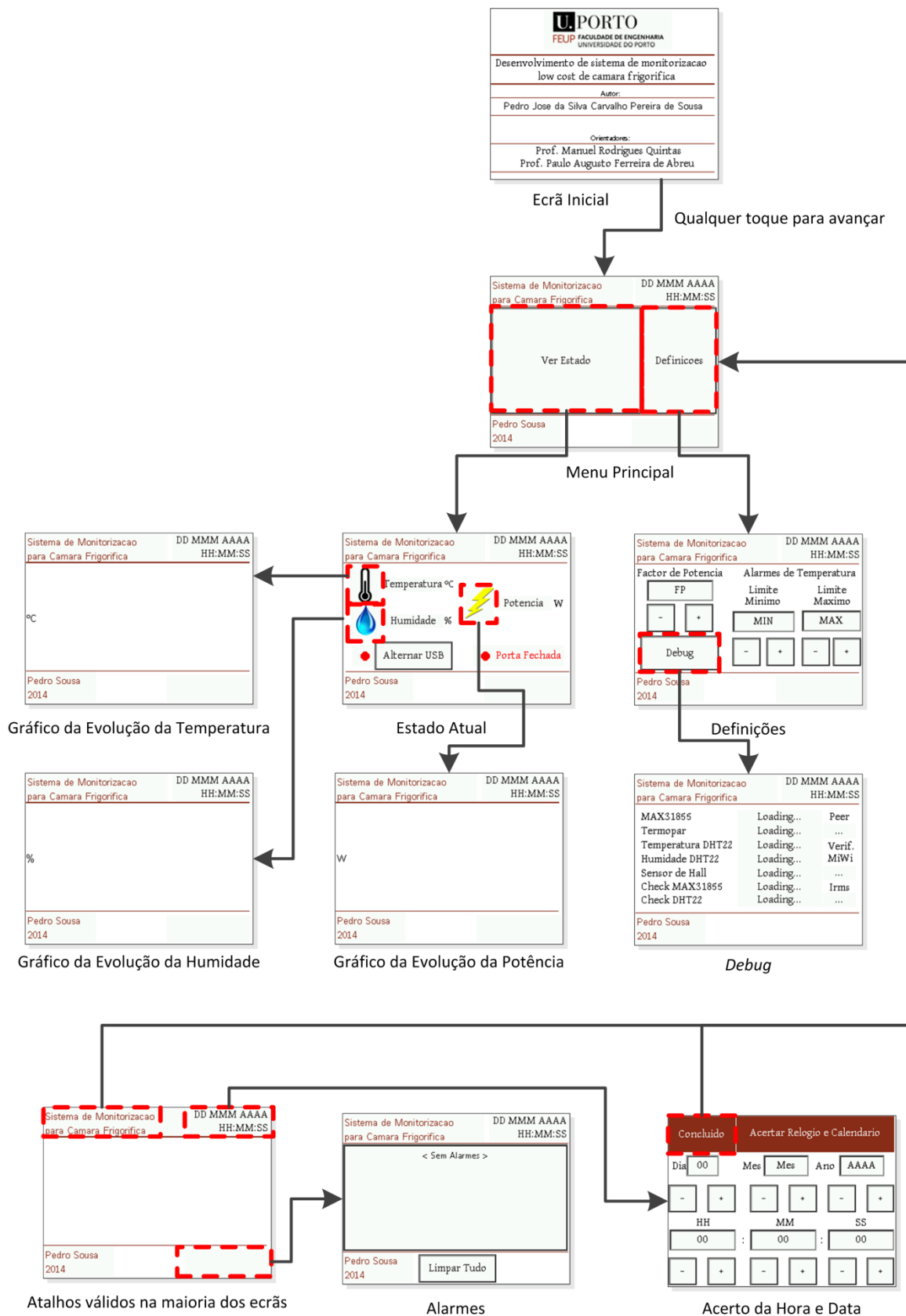


Figura 4.27 – Representação da interface gráfica desenvolvida e das interligações entre os diferentes ecrãs

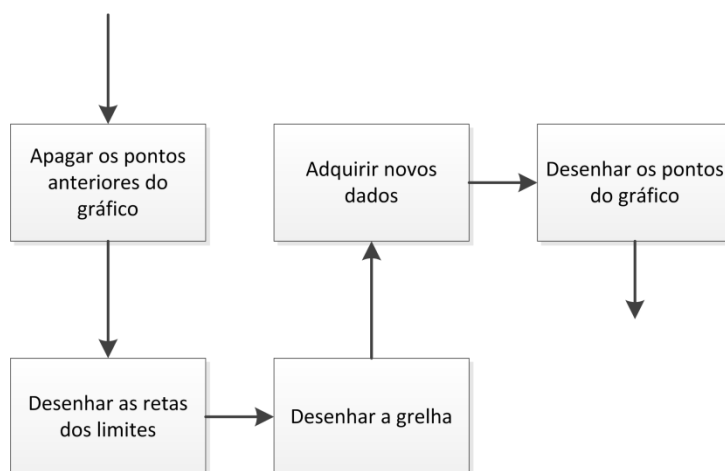


Figura 4.28 – Passos para desenho ou atualização dos gráficos

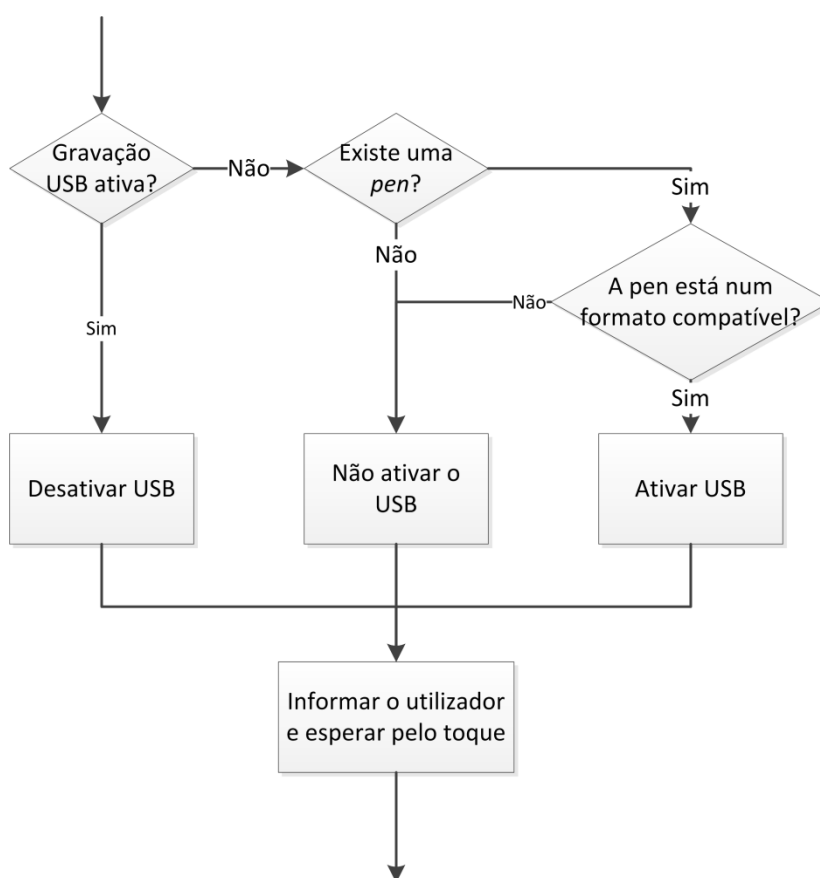


Figura 4.29 – Procedimento utilizado para alternar o estado de gravação USB

Carregando em qualquer um dos ícones destes parâmetros, o utilizador é levado ao respetivo gráfico de evolução. Nestes, o gráfico é também atualizado com uma periodicidade de 1 segundo e apresenta, no caso da temperatura, uma escala baseada nos valores máximo e mínimo introduzidos pelo utilizador.

Na maioria destes ecrãs é possível visualizar a data e hora atuais e o último alarme gerado, bem como navegar diretamente para o ecrã de visualização de

alarmes, para o ecrã de acerto do relógio e do calendário assim como para o “Menu Principal”.

No ecrã de visualização de alarmes apresenta-se uma lista de até cinco alarmes, podendo este limite ser aumentado ou reduzido facilmente aquando da compilação. Para além disso, o utilizador tem a possibilidade de limpar esta lista através da interface gráfica.

O ecrã de acerto do relógio e do calendário permite definir a data e hora atuais, através da utilização dos botões + e -. Estas informações, para além de serem apresentadas ao utilizador na maioria dos ecrãs, são utilizadas para a gravação de dados na *pen* USB e são sempre associadas a cada alarme gerado. No caso de a gravação de dados USB estar ativa, qualquer alarme gerado é também gravado num ficheiro *log* na *pen* USB.

A comunicação deste módulo com os restantes é feita na rotina *main()*, com um período de 1 segundo. Para além disso, este módulo verifica o estado de cada sensor através das variáveis de verificação respetivas e apenas utiliza aqueles que forneçam dados válidos, o que permite ao sistema funcionar apenas com uma parte dos sensores.

Para além disso, com uma periodicidade de 15 minutos (parametrizável para outros valores a nível da compilação) e se a gravação de dados USB estiver ativa, o sistema adiciona uma linha relativa ao estado da câmara frigorífica nesse instante a um ficheiro *csv*, estando cada uma associada à data e hora em que foi obtida. Estes dados podem ser tratados posteriormente em qualquer *software* compatível, como por exemplo o Microsoft Excel.

O procedimento de gravação, representado em diagrama de blocos na Figura 4.30, começa por verificar se a funcionalidade está ativa, procedendo de seguida à confirmação do formato e da presença da *pen*. O sistema grava ficheiros de nome variável, no formato *DDMMMAA*. Por exemplo, para a data 19 de Junho de 2014 o nome de ficheiro é *19JUN14.csv*. Verificou-se que com nomes de ficheiro mais compridos do que estes a biblioteca USB não consegue funcionar, chegando mesmo a fazer *reset* ao dispositivo.

Antes de começar a escrita de quaisquer dados, o sistema verifica se este ficheiro já existe e em caso contrário cria-o e escreve o seu cabeçalho.

Para o ficheiro *.csv* ser compatível com o maior número possível de *softwares*, tornou-se necessário incluir a definição do separador utilizado. Isto é feito na primeira linha do ficheiro através da definição da variável *sep*, definida nesta implementação como “*sep=;*”.

Para além disso, verificou-se que o carater de nova linha, ‘\n’, não era suficiente para forçar o sistema a continuar a escrita numa nova linha se este fosse lido num sistema *Windows*. Para estes sistemas é necessário introduzir a sequência ‘\r\n’, normalmente referida como CR+LF, siglas dos nomes destes caracteres: *Carriage Return* (‘\r’) e *Line Feed* (‘\n’).

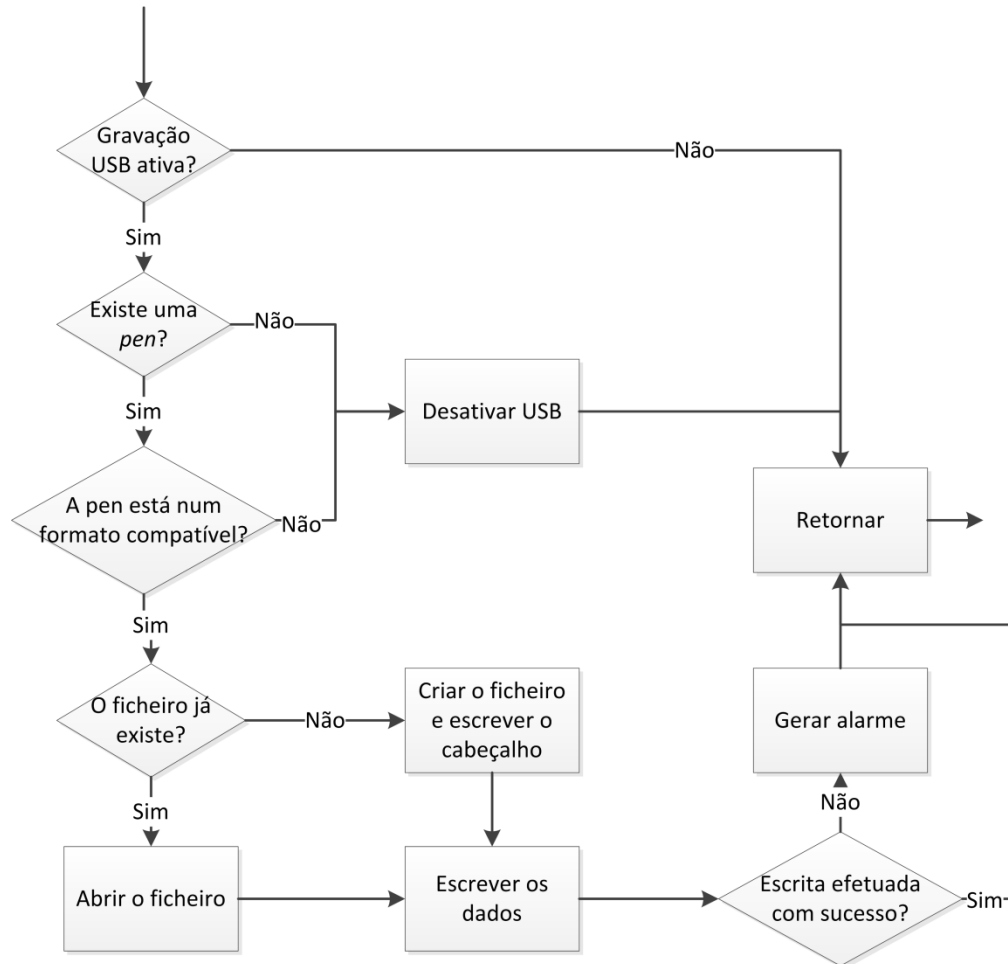


Figura 4.30 – Procedimento utilizado para a gravação de dados na memória USB

É de salientar que a alteração de qualquer periodicidade pode ser feita de forma expedita através da alteração de constantes do pré-processador e que o sistema de gravação pode ser expandido de forma a guardar um maior número de variáveis com uma alteração de poucas linhas de código.

Para além disso, a interface gráfica apresenta por defeito o valor de temperatura obtido a partir do termopar, embora seja capaz de reverter para o valor obtido a partir do DHT22 se o primeiro não estiver disponível.

4.5 Conclusão

Utilizando a biblioteca gráfica da *Microchip*, foi possível desenvolver uma interface gráfica ao nível de qualquer HMI disponível no mercado. Isto foi realizado de uma forma que dá um grande controlo ao utilizador e, portanto, possui uma maior flexibilidade do que estas soluções comerciais, embora exija ao utilizador um maior conhecimento do seu método de funcionamento.

Verificou-se que o funcionamento desta interface foi condicionado pela dificuldade em soldar o conector FPC nas placas de circuito impresso, o que causou instabilidade de deteção das coordenadas de toque e, por vezes, um maior atraso no desenho dos objetos. Isto foi comprovado pelo facto de normalmente ser possível melhorar ambos os efeitos através do reaquecimento da ligação soldada. Por este motivo, optou-se por implementar a interface de modo a esta ser o mais imune possível a estes efeitos, ou seja, utilizando botoneiras de grandes dimensões e eventos *on press*, que, embora menos indicados para interfaces gráficas que os *on release*, funcionam de uma forma mais previsível em condições adversas.

No que toca às comunicações, foi possível implementar diferentes protocolos, cablados e sem fios, num curto espaço de tempo, sendo possível alterar a frequência de amostragem através da definição de parâmetros do pré-processador.

Os programas desenvolvidos, para além de implementarem as funcionalidades pretendidas de monitorização das informações dos sensores, permitem implementar um sistema de gestão de alarmes. Este sistema permite avisar o utilizador tanto de valores de temperatura fora da gama permissível, definida na interface gráfica, como de problemas de ligação com os sensores. Para além disso, este sistema pode ser expandido facilmente com um número reduzido de linhas de código.

5 Implementação Experimental

Este capítulo reporta o processo de implementação dos módulos desenvolvidos. De seguida, refere os testes efetuados, nomeadamente de verificação e caracterização de sensores e das comunicações SPI e 1-wire. Por fim, é reportada a implementação deste sistema de monitorização no frigorífico disponível no LIM.

5.1 Módulo HMI

A implementação experimental do módulo HMI passou por várias fases. Iniciou-se pela impressão e teste do funcionamento da placa de circuito impresso central, processo este que foi necessário repetir diversas vezes, principalmente devido a dificuldades com a soldagem do conector de ligação ao LCD.

Após essa fase, passou-se para a impressão e teste da placa de circuito impresso MiWi. Assim que se verificou o correto funcionamento desta, procedeu-se à impressão das diferentes peças que constituem o alojamento para este módulo, representadas na Figura 5.1. Para todas estas impressões o material utilizado foi o PLA (Ácido Polilático).

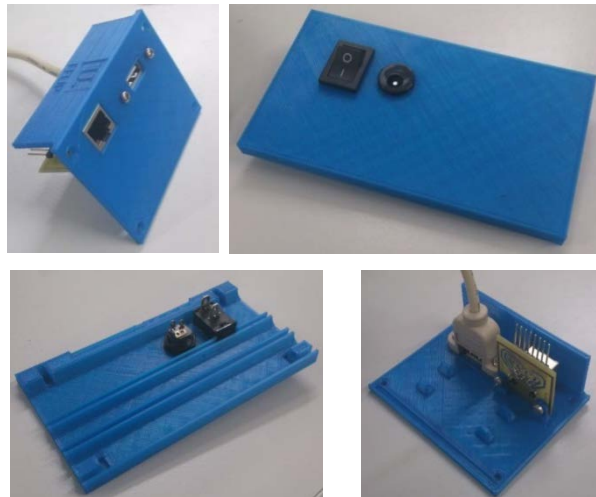


Figura 5.1 – Peças do alojamento para o módulo HMI impressas em PLA

Tendo todos estes componentes, foi necessário realizar a sua montagem num módulo final. Na Figura 5.2, apresenta-se este módulo em processo de montagem e, na Figura 5.3, apresenta-se o resultado final.

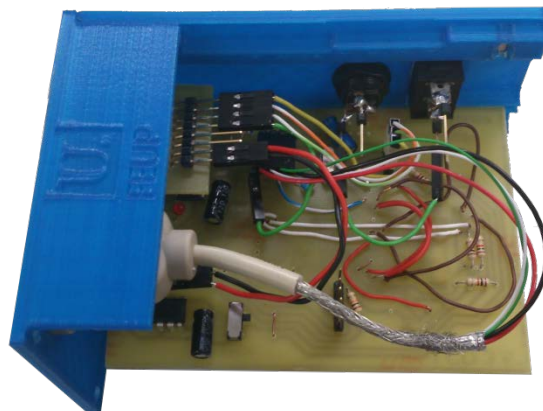


Figura 5.2 - Protótipo do módulo HMI em processo de montagem



Figura 5.3 - Protótipo do módulo HMI

Após esta montagem e a programação de ambos os microcontroladores incluídos neste módulo, foi possível obter um módulo HMI funcional. Na Figura 5.4 é possível ver este módulo em funcionamento, apresentando o ecrã de informações atuais do sistema, com informações obtidas a partir de ambos os módulos de sensores.



Figura 5.4 - Fotografia do ecrã “Estado Atual” do protótipo sistema de monitorização.

5.1.1 Teste de Comunicação SPI

Para verificar o correto funcionamento das comunicações SPI, implementadas entre o módulo HMI e o módulo de sensores interno, recorreu-se à visualização dos vários sinais no osciloscópio.

A título de exemplo, na Figura 5.5 apresenta-se a evolução do sinal de relógio no canal 1, em cima, e a evolução do sinal de *chip select* no canal 2, em baixo. Para além disto, na Figura 5.6 apresenta-se novamente a evolução do sinal de relógio no canal 1, desta vez acompanhada pelo sinal de saída do PIC24FJ256GB110, durante o envio de um *byte* 0xEE, que se traduz no número binário 11101110.

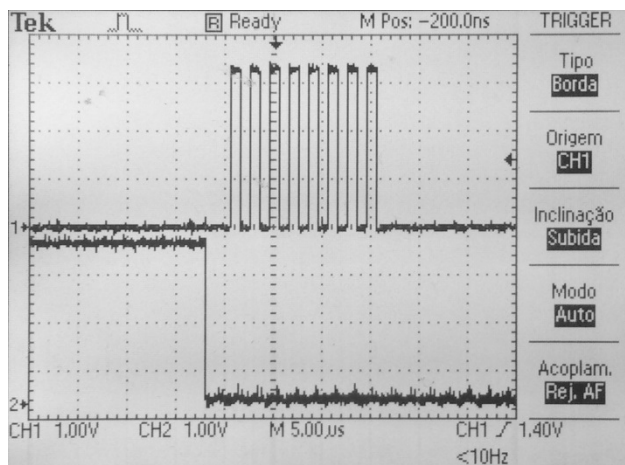


Figura 5.5 – Comunicação SPI: Sinal de relógio no canal 1 e *Chip Select* no canal 2

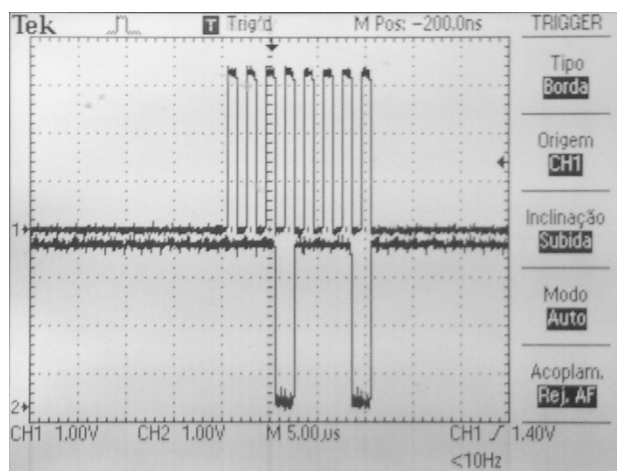


Figura 5.6 – Comunicação SPI: Sinal de relógio no canal 1 e sinal de saída do PIC24FJ256GB110 no canal 2, enviando um *byte* 0xEE

Pode-se ainda concluir que a utilização da comunicação SPI é uma das formas mais fáceis e expeditas de fazer a comunicação entre dois dispositivos, podendo ser utilizada nas mais diversas situações.

5.2 Módulo de Sensores Internos

A implementação experimental do módulo de sensores internos iniciou-se pela montagem e desenvolvimento do circuito eletrónico numa *breadboard*.

De seguida, passou-se para a impressão e teste de uma placa de circuito impresso. Depois de verificar que esta placa se encontrava funcional, imprimiram-se as peças que constituem o alojamento deste módulo e montou-se o protótipo, apresentado na Figura 5.7.

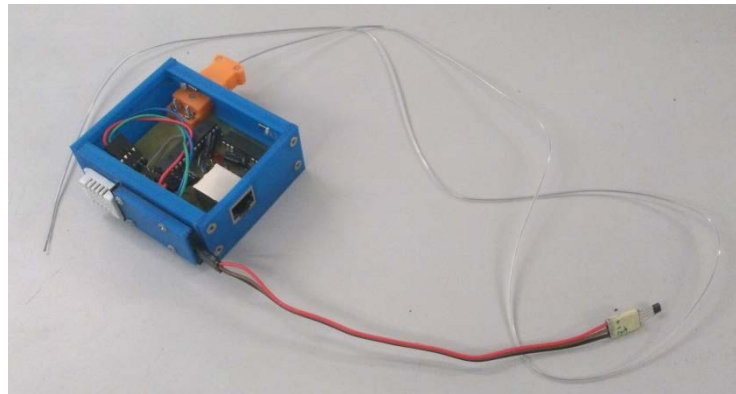


Figura 5.7 – Fotografia do módulo de sensores internos

5.2.1 Sensor de humidade e temperatura DHT22

Para verificar o funcionamento da comunicação 1-wire recorreu-se ao osciloscópio para identificar os quatro *bytes* que são enviados pelo sensor de modo a ser possível a sua comparação com o valor lido pelo microcontrolador. Foi assim possível comprovar que a transmissão se efetua corretamente. Na Figura 5.8 apresenta-se o início de uma comunicação 1-wire entre o sensor DHT22 e o microcontrolador.

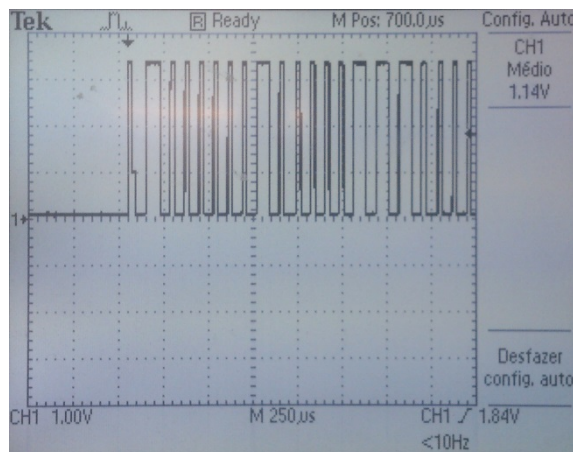


Figura 5.8 - Primeiros *bits* enviados pelo DHT22

Para verificação dos valores lidos pelo sensor de humidade DHT22 recorreu-se a um multímetro digital com capacidade de leitura de humidade relativa, tendo-se verificado que o valor obtido se encontra dentro da margem definida no *datasheet* do sensor, $\leq \pm 5\%$, e verificada experimentalmente por [90].

5.2.2 Termopar

Uma vez que se implementaram dois sensores capazes de medir temperatura, foi possível verificar os seus valores por comparação entre si e com outros sistemas de medição de temperatura disponíveis no LIM.

Verificou-se que ambos os sensores apresentam leituras próximas das obtidas com outros sistemas de medição, embora também se verifique que a utilização de um termopar dotado de um cabo longo introduz ruído, que pode ser reduzido enrolando-o sobre si próprio ou encurtando-o. Isto deve-se ao facto de o ambiente onde foi testado conter radiação eletromagnética e um termopar deste tamanho comportar-se como uma antena.

5.2.3 Isolamento elétrico dos reguladores de tensão

Para verificar a eficácia da alteração do regulador de tensão MAX884 para o DCR010503, recorreu-se ao osciloscópio para comparar o ruído à saída de cada um destes.

Assim, utilizando exatamente a mesma fonte de alimentação a 5V e a montagem recomendada no *datasheet* para cada um dos reguladores, foi possível verificar que a utilização do isolamento reduz para metade o ruído à saída do regulador. Verifica-se através das medições do osciloscópio, apresentadas na Figura 5.9 e na Figura 5.10, que a tensão pico-a-pico é de aproximadamente 760 mV à saída do MAX884 e de aproximadamente 400 mV à saída do DCR010503.

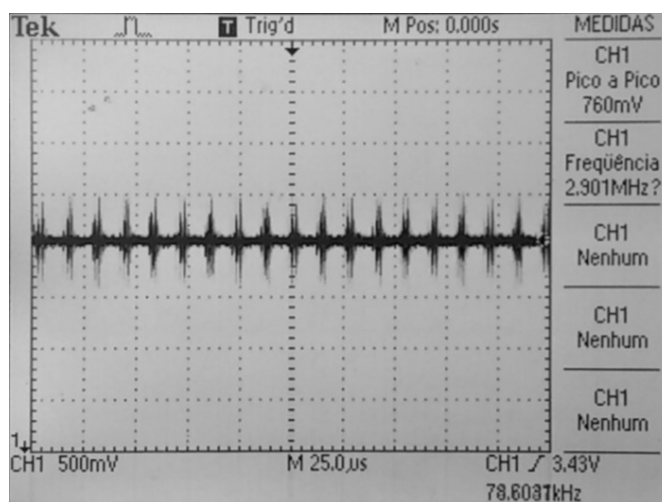


Figura 5.9 – Ruído à saída do MAX884 da *Maxim Integrated*

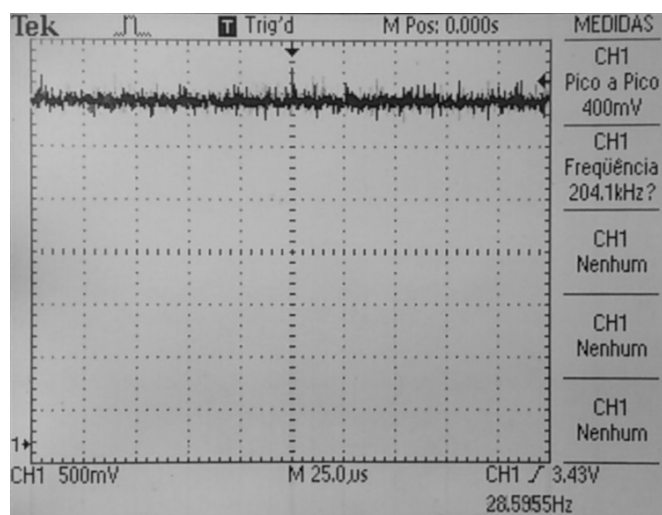


Figura 5.10 – Ruído à saída do DCR010503 da *Texas Instruments*

Desta análise é possível concluir que o regulador com isolamento, como seria de esperar, possui um ruído à saída consideravelmente inferior ao do regulador sem isolamento.

5.3 Módulo de Sensor Externo

A montagem do protótipo do módulo de sensor externo foi especialmente desafiante, uma vez que houve necessidade de incorporar novas ligações na placa e de obter a distribuição espacial para permitir uma mais fácil montagem, o que se traduziu num processo inerentemente iterativo.

Ainda com o sensor de corrente ACS712, foi possível ligar todos os componentes, de uma forma que tornava difícil, embora possível, a sua montagem no alojamento, conforme se pode verificar através da Figura 5.11.

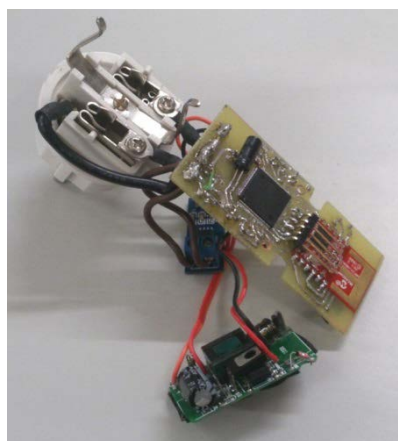


Figura 5.11 – Ligação dos diferentes componentes do módulo de sensor externo, antes da alteração de sensor de corrente.

Para ser possível a construção deste protótipo, foi necessário também construir um protótipo de sensor de corrente, baseado numa construção como a representada na Figura 5.12.

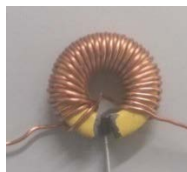


Figura 5.12 – Sensor de corrente desenvolvido, sem revestimento

De seguida, colou-se o sensor de efeito de Hall à bobine, e revestiu-se o sensor com várias camadas de fita isoladora, com uma camada de folha de alumínio no meio, obtendo o representado na Figura 5.13.



Figura 5.13 – Sensor de corrente desenvolvido, após revestimento

A alteração para o sensor de corrente desenvolvido obrigou a reposicionar o sensor de medição de corrente, passando para o lado oposto à placa de circuito impresso. Isto obrigou à destruição de nervuras dos suportes de alguns parafusos da tampa. Para além disso, foi necessário remover suportes existentes na caixa que, sendo desnecessários para esta aplicação, impediam o fecho do alojamento, nomeadamente devido a um conflito com os *headers* de programação.

Na Figura 5.14 apresenta-se o resultado final desta montagem, com indicação dos componentes principais.

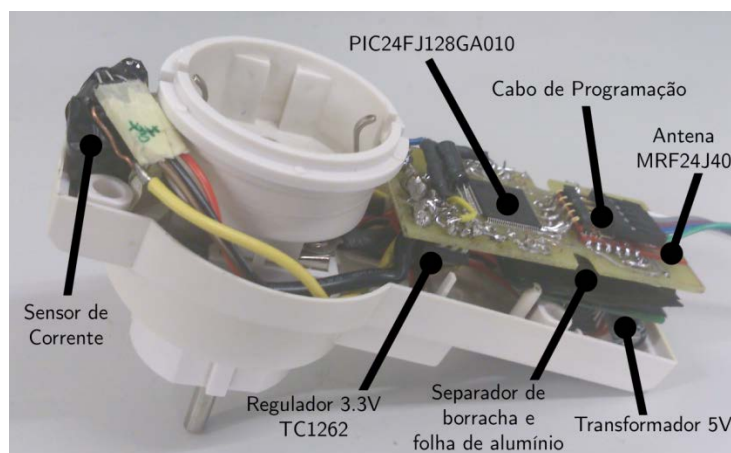


Figura 5.14 – Protótipo do módulo de sensor externo, com indicação dos principais componentes

5.4 Teste e Caracterização dos sensores de corrente

5.4.1 Sensor comercial ACS712

Para uma melhor caracterização do sensor de corrente ACS712, foi obtida a sua característica com uma solicitação CC, com posterior validação em CA. Para tal, utilizou-se uma fonte de corrente associada à medição da tensão à saída do sensor, analisando também o resultado de conversão A/D do microcontrolador.

Considerando diversas amostras para cada valor de corrente e calculando a sua média, foi possível obter o gráfico apresentado na Figura 5.15, na qual se pode verificar que existe uma linearidade assinalável entre a média das amostras e a corrente introduzida no sistema. No entanto, verificou-se também que os valores medidos apresentavam uma variação média de cerca de 30 mV, o que se traduz numa incerteza de cerca de 150 mA, o que é um valor exageradamente alto. Para o cálculo desse valor foi considerada a sensibilidade experimental obtida a partir da aplicação do método dos mínimos quadrados ao conjunto de pontos obtido na caracterização, ou seja, cerca de 195 mV/A (0.1949 V/A).

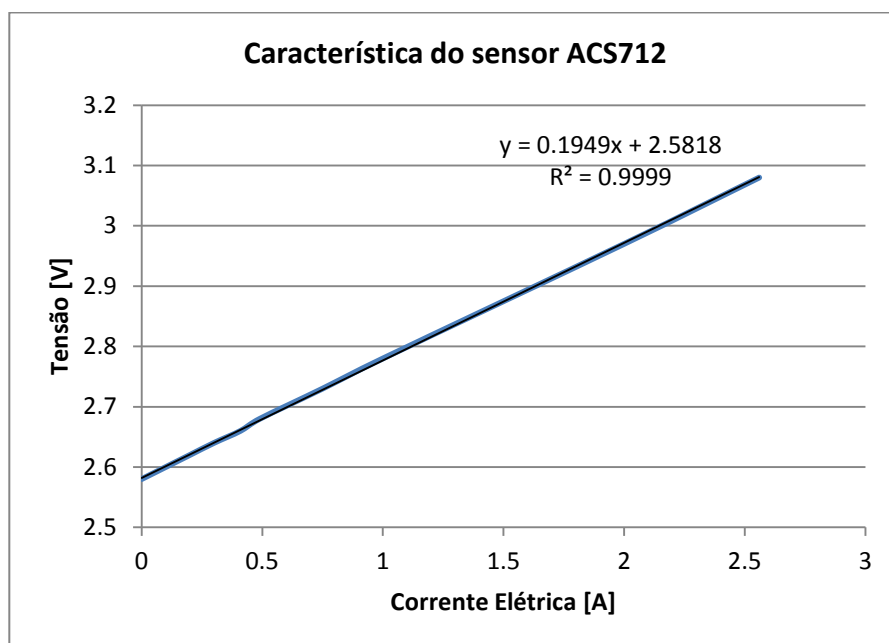


Figura 5.15 - Característica do sensor de corrente ACS712

Isto pode ser verificado em [49], onde a *Allegro MicroSystems* refere que a resolução que se pode obter com este sensor é limitada pelo seu nível de ruído, sendo apenas possível atingir resoluções na ordem dos 100 mA.

Para além desta caracterização efetuou-se um teste em corrente alterna, no qual se verificou uma grande variação. Para tal, utilizou-se uma pistola de cola

quente cuja potência é de 20W. Como esta pistola representa tipicamente uma carga resistiva, espera-se que o fator de potência respetivo seja próximo da unidade. Assim, as medições RMS da corrente devem ser de $\frac{20}{230} \approx 87 \text{ mA}$, o que implica que a tensão RMS à saída do sensor deve ser de $\approx 17 \text{ mV}$.

Na Figura 5.16 é possível ver a onda de tensão à saída do sensor, tendo-se verificado que os valores medidos pelo osciloscópio não eram estáveis, variando consideravelmente. É de salientar que o osciloscópio também introduz um certo ruído nas medições, principalmente de muito baixa tensão.

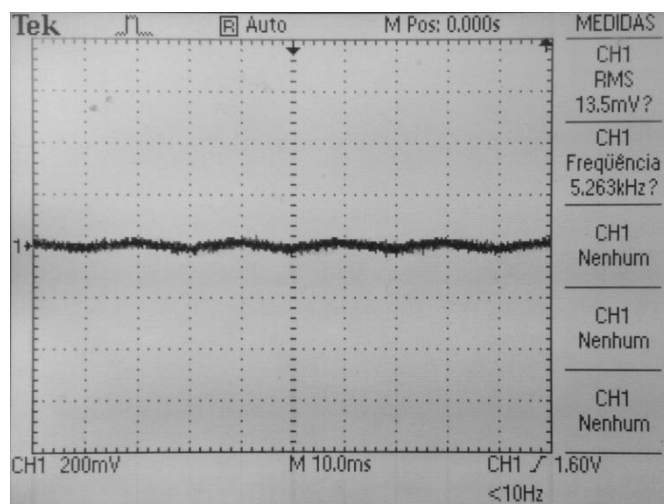


Figura 5.16 – Onda de tensão à saída do elemento sensor, com as medições efetuadas pelo osciloscópio

A partir desta análise experimental, é possível concluir que este elemento sensor, embora seja consideravelmente linear, possui um ruído inerente considerável, dificultando a obtenção de valores constantes com a sua implementação.

Desta forma, verifica-se que este sensor não é o mais indicado para utilizar com o sistema de monitorização desenvolvido uma vez que uma resolução de 100 mA, ou 23 W, não é a mais adequada para um sistema deste género, pelo que se desenvolveu um sensor alternativo.

5.4.2 Sensor desenvolvido

Tendo em conta que este sistema se destina a uma câmara frigorífica que é alimentada através de corrente alterna, efetuou-se a caracterização do sensor desenvolvido diretamente em termos de tensão e corrente RMS.

Recorreu-se a um regulador de tensão em corrente alterna (*Variac*), a vermelho na Figura 5.17, e de um motor universal, à esquerda do regulador na figura. Alterando a tensão de alimentação através da utilização do regulador e mantendo o motor como carga, obtêm-se diferentes correntes consumidas que são medidas com um multímetro.

Uma vez que se trata de corrente CA, a saída de tensão do sensor também é uma onda variável no tempo a uma frequência de 50 Hz. Assim, recorreu-se ao osciloscópio para permitir a visualização desta onda e obter os valores RMS de tensão, como se pode verificar pela Figura 5.18.

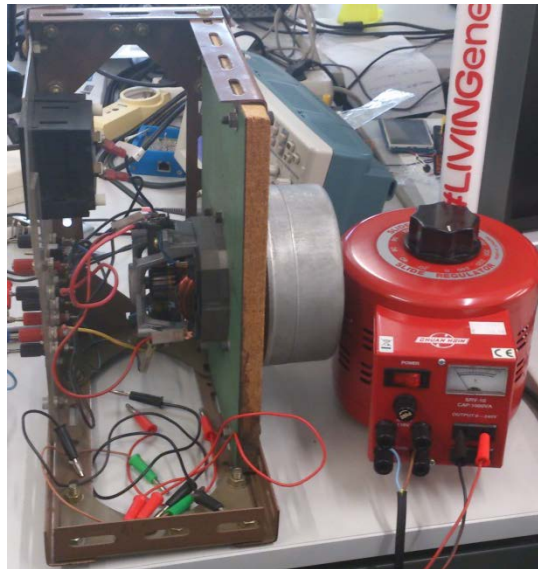


Figura 5.17 – Principais componentes utilizados para a caracterização em CA do sensor de corrente

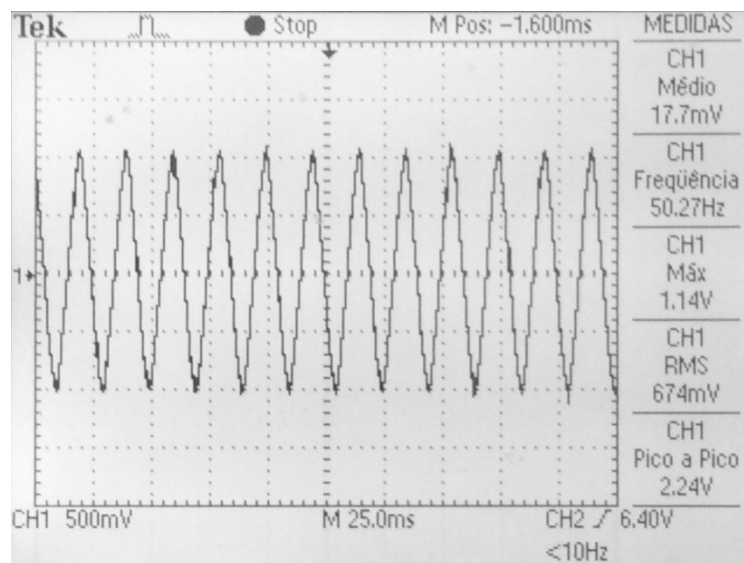


Figura 5.18 – Onda de tensão gerada pelo sensor de corrente

A partir dos dados obtidos, foi possível definir a característica apresentada na Figura 5.19.

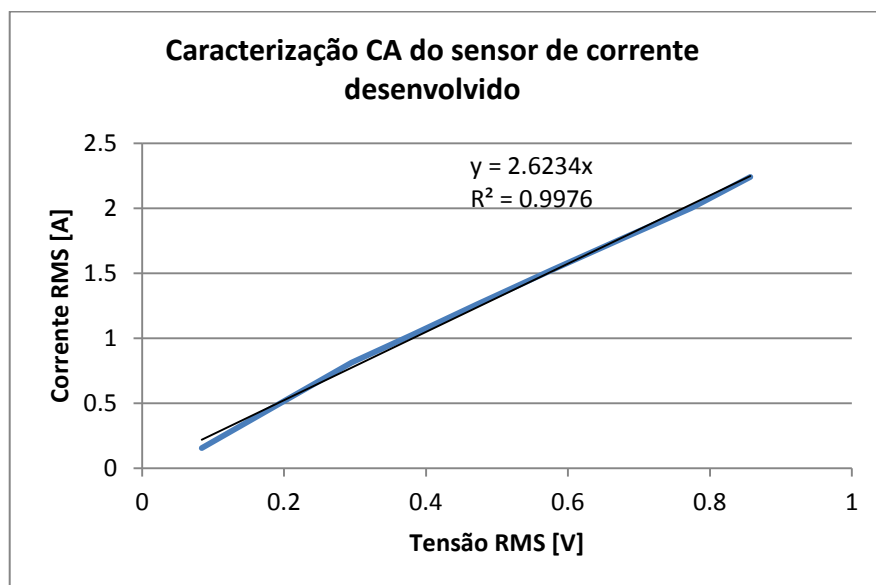


Figura 5.19 – Característica do sensor de corrente desenvolvido, em CA

Verificou-se, assim, que se obtém uma gama de até cerca de 2.25 A em CA, o que responde aos requisitos definidos. Para além disso, o valor lido possui uma estabilidade consideravelmente maior que a do sensor ACS712.

É de salientar que o facto de se utilizar o sensor com uma alimentação de 5 V e com a sua saída ligada diretamente ao microcontrolador limita a corrente máxima que pode ser medido com este sensor a 1.75 A_{RMS}. Assim, este sistema apenas pode ser utilizado em equipamentos de potência até 300 W, considerando um caso limite com fator de potência de 0.89 e mantendo uma margem de segurança.

Para confirmar o correto funcionamento do sensor de corrente, procedeu-se à sua comparação com um dispositivo comercial de medição de potência, o *Paget Trading 9149*. Este sensor apresenta, segundo o respetivo manual, uma margem de erro de $\pm 3\%$, com um erro mínimo de ± 0.03 A.

Assim, montando estes sistemas em série e introduzindo uma carga, é de esperar que estes apresentem valores aproximados de corrente RMS. Na Figura 5.20 apresenta-se a comparação entre estes, utilizando para carga uma pistola de cola quente com potência nominal de 20W.

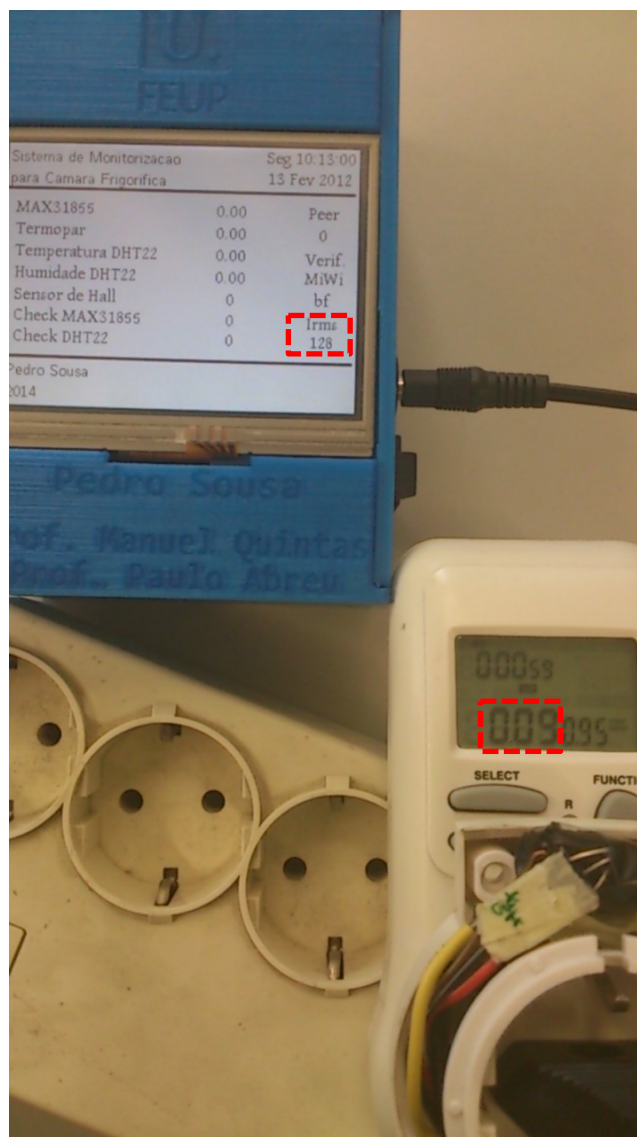


Figura 5.20 – Verificação do sensor de corrente com um medidor de potência

O aparelho comercial utilizado indica 90 mA enquanto o sistema de monitorização desenvolvido indica 128 mA, o que se traduz numa diferença de cerca de 8 W nesta situação. Esta diferença é aceitável, tendo em conta que é medida nas proximidades do limite inferior da gama de medição. Para além disso, o facto de não ser possível imobilizar o elemento sensor completamente e o facto de o sensor se encontrar muito próximo de condutores de grande diâmetro onde circula a mesma corrente podem introduzir um certo erro, nomeadamente através da influência de outros campos magnéticos.

Para uma verificação adicional, foi obtido o formato da onda adquirida pelo microcontrolador. Para tal, recorreu-se ao modo de *debug* do MPLAB X para exportar um ficheiro .csv das diferentes medições do conversor analógico-digital. É possível verificar, a partir da representação desta onda na Figura 5.21, que esta implementação de medição de corrente, embora apresente um certo ruído,

permite uma deteção bastante fiável da evolução temporal da corrente elétrica consumida.

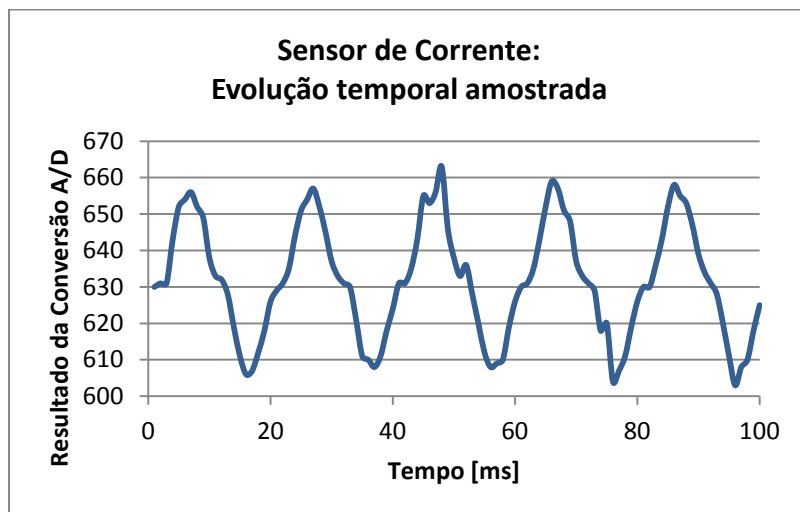


Figura 5.21 – Evolução temporal da saída do conversor ADC associado ao sensor de corrente ao longo de cinco ciclos (100 ms)

Tendo tudo isto em conta, é possível concluir que este sensor corresponde às necessidades para este sistema, sendo capaz de corresponder a solicitações CA de baixa amplitude.

5.5 Integração do sistema em frigorífico

Tendo desenvolvido protótipos de todos os módulos que constituem o sistema de monitorização, representados no seu conjunto na Figura 5.22, foi possível testar o seu funcionamento no frigorífico do LIM.



Figura 5.22 - Protótipo dos diferentes módulos do sistema de monitorização

A montagem do sistema no frigorífico pode ser vista na Figura 5.23. É de salientar que o módulo de sensores internos foi pensado para ser utilizado independentemente do lado de fixação da porta. Assim, para montar esse módulo basta manter a ligação RJ45 para a frente e o sensor de efeito de Hall virado para o lado de fixação da porta.



Figura 5.23 - Fotografias do sistema após implementação no frigorífico do LIM

O sistema permaneceu em funcionamento ao longo de um dia, tendo-se exportado informações para uma memória USB relativas a uma hora. A frequência de exportação foi configurada para ter um período de 1 minuto. Na Figura 5.24 apresenta-se um excerto dos dados exportados durante essa hora de funcionamento no *Microsoft Excel*.

	A	B	C	D	E	F
1	Data	Hora	Temperat	Humidade	Abertura	Potencia
2	27-06-2014	12:00:26	10	42.4	0	1
3	27-06-2014	12:01:27	9.8	43.3	0	1
4	27-06-2014	12:02:28	9.8	43.7	0	1
5	27-06-2014	12:03:29	9.8	44.1	0	2
6	27-06-2014	12:04:29	9.8	44.5	0	1

Figura 5.24 – Excerto de um ficheiro .csv exportado pelo sistema durante a sua implementação no frigorífico do LIM

A partir das informações adquiridas ao longo dos primeiros 45 minutos, foi possível desenhar o gráfico apresentado na Figura 5.25. Neste pode-se verificar que, tal como seria de esperar, a abertura da porta provoca um aumento tanto de temperatura como de humidade e que, passado pouco tempo, o motor entra em funcionamento. Após o fecho da porta, verifica-se que os valores de humidade e temperatura vão diminuindo até aos seus valores iniciais e que o consumo do motor é aproximadamente constante durante esta evolução. É de salientar que o declive da transição entre os estados de abertura da porta de acesso é devido ao intervalo de tempo entre duas amostragens consecutivas.

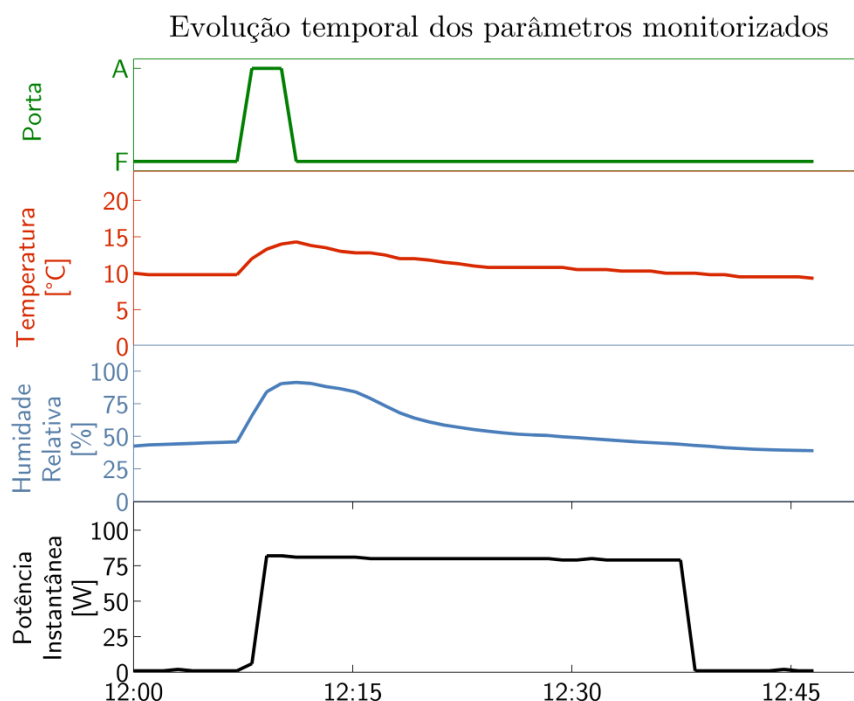


Figura 5.25 – Evolução dos parâmetros monitorizados, das 12 horas às 12:46. (A – Porta Aberta, F – Porta Fechada)

Para além dos dados exportados, a interface gráfica desenvolvida ainda permite gerar gráficos com horizontes de 5 minutos da evolução da temperatura, da humidade relativa e da potência. Na Figura 5.26 apresenta-se um gráfico gerado no módulo HMI relativo à temperatura no interior do frigorífico, no qual é possível ver as variações de temperatura, ocorridos por causa da abertura da porta de acesso.

Os valores de potência obtidos são semelhantes aos apresentados pelo *Paget Trading 9149*. Os sensores de temperatura que foram implementados, o termopar e o DHT22, apresentaram também valores próximos. Desta forma, foi possível verificar que o sistema se comporta conforme o esperado quando implementado no frigorífico do LIM.



Figura 5.26 – Gráfico gerado pelo módulo HMI a partir das informações recebidas

5.6 Conclusão

Neste capítulo apresentaram-se os protótipos desenvolvidos, o teste das comunicações associadas e o teste e a caracterização dos sensores de corrente.

Todo este processo foi em muito facilitado pela possibilidade de utilizar a impressora 3D e de imprimir PCBs no LIM, originando protótipos funcionais que podem ser montados em qualquer câmara frigorífica.

Verificou-se que todos os sensores utilizados foram implementados corretamente e funcionam. Os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza que os obtidos com outros meios disponíveis no mercado. Para além disto, a caracterização e teste dos sensores de corrente permitiu concluir que o sensor desenvolvido tem grandes potencialidades, especialmente se utilizado com uma caixa desenhada para tal que garanta um maior isolamento deste sensor relativamente aos campos eletromagnéticos externos.

Para além disso, foi possível verificar que todas as comunicações implementadas são efetuadas sem quaisquer problemas. Também se abordou o problema do isolamento elétrico dos reguladores de tensão no módulo de sensores internos, tendo-se conseguido reduzi-lo para níveis aceitáveis.

Assim, os resultados da implementação experimental são coerentes com o esperado, tendo sido alcançados todos os objetivos definidos para o trabalho.

Por fim, efetuou-se a implementação deste sistema no frigorífico do LIM e apresentou-se um excerto dos resultados obtidos. A partir destes dados, verifica-se que o protótipo desenvolvido é perfeitamente funcional.

6 Conclusões

Com este trabalho, desenvolveu-se um sistema de monitorização para câmaras frigoríficas baseado em microcontroladores e eletrónica customizada e dotado de uma arquitetura modular e expansível.

O sistema permite monitorizar a temperatura, a humidade relativa, a abertura/fecho da porta e o consumo energético da câmara frigorífica.

Este sistema é constituído por três módulos, um que realiza funções de interface com o utilizador, outro que permite adquirir e comunicar os valores de temperatura, humidade relativa e abertura da porta e um terceiro que permite monitorizar a corrente elétrica consumida pelo sistema, comunicando através de uma ligação sem fios.

O módulo HMI, de interface com o utilizador, é dotado de um ecrã tátil onde é possível visualizar os dados obtidos tanto de forma numérica como através de gráficos do tipo *strip chart*, visualizar os alarmes gerados pelo sistema e interagir com elementos de memória USB, tais como *pens*. Para além disso, ainda pode comunicar através dos protocolos SPI e MiWi. Para além disso, verifica-se que, com uma gravação a cada minuto, uma memória USB de 256 MB é suficiente para mais de 75 dias.

O módulo HMI é alimentado por um transformador de 9V externo e alimenta o módulo de sensores interno através da cablagem utilizada entre eles. O módulo de sensor externo retira diretamente energia da tomada elétrica à qual está ligado.

Uma característica a destacar neste sistema é a possibilidade de funcionamento autónomo dos módulos desenvolvidos, o que permite futuras expansões e aplicação em outras áreas. É de salientar que o módulo HMI que foi

desenvolvido ao longo desta dissertação já foi utilizado em duas outras dissertações que decorreram ao mesmo tempo [91, 92]. Outra característica importante deste sistema é a sua capacidade de expansão, uma vez que as comunicações implementadas podem facilmente suportar um maior número de dispositivos.

Para a implementação do sistema foram desenvolvidas de raiz placas de circuito impresso dedicadas e construídos protótipos para alojar os componentes, tendo-se também desenvolvido e calibrado um sensor de corrente elétrica.

Foram implementados diversos tipos de comunicações, cabladas e sem fios, e desenvolvida uma aplicação de *software* que implementou as funcionalidades pretendidas de monitorização dos parâmetros de temperatura, humidade relativa, deteção de abertura da porta e consumo elétrico. Esta aplicação é executada a nível do microcontrolador, tirando partido do ecrã tátil.

Foram desenvolvidos um conjunto de funcionalidades de configuração, registo e visualização de dados, dos quais se destacam os seguintes:

- Capacidade de visualização simultânea da temperatura, da humidade relativa, do consumo energético e do estado de abertura da porta, disponibilizados por informação numérica;
- Registo e visualização de situações de alarme, relativas tanto a problemas de comunicação com os sensores como a valores de temperatura fora da gama definida pelo utilizador;
- Parametrização via consola de valores limite (superior e inferior) para a temperatura, da data e hora e da configuração do sensor de consumo energético;
- Capacidade de visualização de informação histórica através da disponibilização de gráficos para a temperatura, a humidade relativa e a potência instantânea; o eixo Y do gráfico da evolução da temperatura é dependente dos respetivos limites definidos pelo utilizador;
- Armazenamento de dados em memória externa USB com uma periodicidade configurável através de definições do pré-processador.

O programa implementado efetua a aquisição dos dados dos sensores a uma frequência de 1 Hz, excetuando o sensor de humidade DHT22, uma vez que este está limitado de origem a 0.5 Hz. Quando a gravação de dados em memória USB está ativa, esta é feita com uma periodicidade predefinida de 15 minutos e acrescenta a um ficheiro *.csv* os últimos valores medidos, associados à data e hora da gravação. Tanto este sistema de gravação como o sistema de gestão de alarmes são facilmente expansíveis.

Este sistema foi implementado no frigorífico do Laboratório de Instrumentação para Medição (LIM), o que permitiu verificar o seu correto funcionamento.

O custo total do protótipo do sistema de monitorização desenvolvido rondou os 250€, sendo aproximadamente 7€ para elementos sensores, 40€ para as placas de circuito impresso, 60€ para os alojamentos dos módulos, 50€ para o ecrã tátil e componentes associados, 18€ para as antenas de comunicação sem-fios e o restante para cablagem, encaixes, microcontroladores e eletrónica diversa. Verifica-se assim que foi possível desenvolver uma solução de baixo custo.

7 Trabalhos Futuros

O trabalho desenvolvido pode ser utilizado como base para trabalhos futuros, melhorando o sistema existente ou desenvolvendo outros sistemas. Assim, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros a desenvolver a diferentes níveis:

- Ao nível de *hardware*:
 - Substituir o ecrã tátil utilizado por outro que não recorra a conectores FPC;
 - Alimentar o módulo de sensores internos a bateria, alterando a sua comunicação de SPI para MiWi;
 - Alterar o módulo HMI de forma a utilizar apenas um microcontrolador, que inclua tanto a interface gráfica como as comunicações USB, SPI e MiWi;
 - Utilizar um transformador não comutado no módulo de sensor externo para, com ele, também ser possível caracterizar tanto a tensão de alimentação como o fator de potência;
- Ao nível de *software*:
 - Implementar a memória *flash* incluída na placa de circuito impresso desenvolvida;
 - Introduzir o cálculo do consumo de energia em kWh;
 - Parametrização das condições de funcionamento;
- Ao nível de sensores:
 - Implementar a medição de corrente elétrica através de um circuito integrado, nomeadamente o MCP39F501 da *Microchip*;
- Ao nível das possibilidades de comunicação:
 - Desenvolver um amperímetro próprio com capacidade de comunicação sem fios;
 - Introdução da capacidade de ligação à internet, com a implementação de um servidor *web*

Referências

- [1] ABB Limited, "Recording and Control of cold storage monitoring - Monitoring and reporting of accurate temperature control," ed: ABB Limited, 2013.
- [2] Cole-Parmer. (2013, 14-02-2014). *Nor-Lake Scientific -86°C Select Ultra-Low Upright Freezer, 27.5 cuft, 115V* Available: http://www.coleparmer.com/Product/Nor_Lake_Scientific_86C_Select_Ultra_Low_Upright_Freezer_27_5_cuft_115V/EW-44174-78
- [3] Computer Aided Solutions LLC. (2014, 14-02-2014). *Refrigerator and Freezer Monitoring Systems* Available: https://www.dataloggerinc.com/categories/Refrigerator_and_Freezer_Monitoring_Systems/54/
- [4] CoolPac. (2012, 14-02-2014). *Wireless Temperature Monitoring*. Available: <http://www.coolpac.com/products/wireless-temperature-monitoring/>
- [5] Cypress Envirosystems. (2014, 14-02-2014). *Wireless Freezer Monitor*. Available: <http://www.cypressemirosystems.com/products/wireless-freezer-monitor/>
- [6] Danfoss A/S, "Control and monitoring refrigeration systems to comply with HACCP," ed: Danfoss A/S, 2007.
- [7] DJB Labcare Ltd. (2014, 14-02-2014). *Heraeus HERAcell 240i* Available: http://www.djblabcare.co.uk/djb/product/2501/Incubators-51026333-Heraeus_HERAcell_240i
- [8] ebro Electronic GmbH, "Instruments for Food Technology," ed: ebro Electronic GmbH, 2012.
- [9] Enviro Technologies. (2012, 14-02-2014). *Centralised Cold Storage Monitoring Solution*. Available: http://www.enviroworld.in/Cold_Storage_&_Freezer_Monitoring.html

-
- [10] J. A. May, B. M. Schork, and B. J. Beckley, "Refrigerator energy and temperature control," ed: Google Patents, 2012.
 - [11] OPENXTRA Limited. (2013, 14-02-2014). *Cold Storage Temperature Monitoring Solutions*. Available: <http://www.openextra.co.uk/guides/refrigeration-temperature-monitoring-solutions>
 - [12] ROHM Marketing USA, "Low Power Microcontrollers for Temperature, Humidity & Carbon Monoxide Instrumentation," ed: ROHM Marketing USA, 2011.
 - [13] Royal Pharmaceutical Society of Great Britain, "The Safe and Secure Handling of Medicines," ed: Royal Pharmaceutical Society of Great Britain, 2005.
 - [14] Sequoia Technology Group Ltd. (2014, 14-02-2014). *Fridge & Freezer Monitoring*. Available: http://www.sensormetrix.co.uk/fridge_freezer_monitoring_a_6.php
 - [15] J. Taylor, "Recommendations on the control and monitoring of storage and transportation temperatures of medicinal products," *Pharma. J.*, vol. 267, pp. 128-131, 2001.
 - [16] Vaisala. (2013, 14-02-2014). *Refrigerator and Freezer Monitoring*. Available: <http://www.vaisala.com/en/lifescience/applications/refrigeratorandfreezermonitoring/Pages/default.aspx>
 - [17] 胡 . 何 军 , 李 冬 爱 , "On-line monitoring device for refrigerator temperature," 2013.
 - [18] 陆 . 王 铀 , 陈 力 洪 , "Cloud refrigerator capable of remotely performing temperature monitoring," 2013.
 - [19] Government of the United States of America - Centers for Disease Control and Prevention, "Guidelines for Storage and Temperature Monitoring of Refrigerated Vaccines," ed: Centers for Disease Control and Prevention.
 - [20] Instituto Português da Qualidade, "Sistemas de gestão da segurança alimentar. Requisitos para qualquer organização que opere na cadeia alimentar NP EN ISO 22000:2005," ed, 2005.
 - [21] Instituto Português da Qualidade, "Registadores de temperatura para transporte armazenagem e distribuição de alimentos refrigerados, congelados, ultra-congelados e cremes gelados ensaios, avaliação de desempenho, aptidão NP EN 12830: 2008," ed, 2008, pp. 23 p-23 p.
 - [22] Signatrol Ltd., "EN 12830 Declaration of Conformance," ed: Signatrol Ltd., 2012.
-

-
- [23] K.-S. Yang, W.-R. Chang, I.-Y. Chen, and C.-C. Wang, "An investigation of a top-mounted domestic refrigerator," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 1422-1427, 7// 2010.
- [24] J. M. Belman-Flores, A. Gallegos-Muñoz, and A. Puente-Delgado, "Analysis of the temperature stratification of a no-frost domestic refrigerator with bottom mount configuration," *Applied Thermal Engineering*, vol. 65, pp. 299-307, 4// 2014.
- [25] O. Laguerre, S. Benamara, and D. Flick, "Study of water evaporation and condensation in a domestic refrigerator loaded by wet product," *Journal of Food Engineering*, vol. 97, pp. 118-126, 3// 2010.
- [26] O. Laguerre, S. Benamara, and D. Flick, "Numerical simulation of simultaneous heat and moisture transfer in a domestic refrigerator," *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, pp. 1425-1433, 11// 2010.
- [27] S. McCurdy, J. Peutz, and G. Wittman, "Storing Food for Safety and Quality," ed: Pacific Northwest Extension - University of Idaho, Oregon State University, Washington State University, 2009.
- [28] F. Zinzi. (2010). *Refrigerator's Air Circulation and Humidity*. Available: <http://ezinearticles.com/?Refrigerators-Air-Circulation-and-Humidity&id=3657755>
- [29] Cornell Cooperative Extension, "Storage Guidelines For Fruits & Vegetables," ed: Cornell Cooperative Extension.
- [30] ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *2006 ASHRAE Handbook: Refrigeration*: American Society of Heating, Refrigerating & Air Conditioning Engineers, Incorporated, 2006.
- [31] ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals*: American Society of Heating, Refrigerating & Air Conditioning Engineers, Incorporated, 2009.
- [32] Adafruit Industries. (2013, 15-03-2014). *Thermistor*. Available: <http://learn.adafruit.com/thermistor/overview>
- [33] P. Welander. (2007). *Temperature tutorial: Thermocouple vs. RTD vs. thermistor*. Available: <http://www.controleng.com/search/search-single-display/temperature-tutorial-thermocouple-vs-rtd-vs-thermistor/aae906fe91.html>
- [34] MaxDetect Technology Co. Ltd., "Digital relative humidity & temperature sensor RHT03."
- [35] Aosong Electronics Co. Ltd., "Temperature and humidity module - AM2302 Product Manual," ed: Aosong Electronics Co. Ltd.
- [36] jinbostore. (2014, 06-05-2014). *DHT22/AM2302 Digital Temperature and Humidity Sensor*. Available: <http://www.ebay.co.uk/itm/1PCS-DHT22-AM2302-Digital-Temperature-and-Humidity-Sensor-Replace-SHT11->
-

- SHT15-
[/171175166224?pt=UK_BOI_Electrical_Components_Supplies_ET&hash=item27dad5c110](http://171175166224?pt=UK_BOI_Electrical_Components_Supplies_ET&hash=item27dad5c110)
- [37] Wikipedia. (2014, 26-02-2014). *Electric power*. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_power
 - [38] Microchip Technology Inc., "Energy Metering IC with SPI Interface and Active Power Pulse Output," ed: Microchip Technology Inc., 2012.
 - [39] Wikipedia. (2014, 07-06-2014). *Power factor*. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Power_factor
 - [40] Microchip Technology Inc., "MCP39F501 - Single-Phase, Power-Monitoring IC with Calculation and Event Detection," ed: Microchip Technology Inc., 2013.
 - [41] W. Koon, "Current Sensing for Energy Metering," ed: Analog Devices Inc.
 - [42] W. Koon, "Current Sensor in Solid-State Meters," ed: Analog Devices Inc.
 - [43] STMicroelectronics, "Current sensing in metering applications using a Pulse current sensor and ST metering devices," ed: STMicroelectronics, 2010.
 - [44] B. Mammano, "Current Sensing Solutions for Power Supply Designers," ed: Texas Instruments Inc., 2001.
 - [45] TiendaAzul.com. (2013, 20-05-2014). *Cooler Zanussi ZRG10800WA*. Available: <http://www.tiendaazul.com/frigorificos-baratos/7706-cooler-zanussi-zrg10800wa-bandejas-de-cristal-clase-a-7332543262786.html>
 - [46] A CELER CRL, "Novas regras de facturação da energia reactiva," ed, 2010.
 - [47] ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, "Regras de Facturação de Energia Reactiva," ed: ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, 2009.
 - [48] Allegro MicroSystems LLC, "ACS712 - Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor," ed, 2013.
 - [49] Allegro MicroSystems LLC. (2014, 11-06-2014). *ACS712 and ACS713 Current Sensor ICs Frequently Asked Questions*. Available: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712/ACS712-ACS713-Frequently-Asked-Questions.aspx#Q6>
 - [50] Allegro MicroSystems LLC, "A1302 - Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs," ed, 2013.
 - [51] M. T. Restivo, F. G. d. Almeida, M. d. F. Chouzal, J. G. Mendes, and A. M. Lopes, *Laboratórios de Instrumentação para Medição*, 1^a ed. Porto: Editora UP, 2008.

-
- [52] XE. (2014, 08-03-2014). *EUR/USD Chart*. Available: <http://www.xe.com/currencycharts/?from=EUR&to=USD>
- [53] XE. (2014, 08-03-2014). *EUR/GBP Chart*. Available: <http://www.xe.com/currencycharts/?from=EUR&to=GBP>
- [54] International Electrotechnical Commission, "IEC 61131-1: Programmable controllers - Part 1: General information," ed: International Electrotechnical Commission, 2003.
- [55] Newark element14. (2014, 06-05-2014). *Schneider Electric TWDLCAA10DRF*. Available: <http://www.newark.com/schneider-electric/twdlcaa10drf/programmable-logic-controller/dp/97C9270?ost=TWDLCAA10DRF>
- [56] 999 HMIs. (2014, 06-05-2014). *Schneider Magelis Advanced XBT GT1105*. Available: <http://www.999hmis.com/our-hmis/schneider-magelis-advanced-xbt-gt1105>
- [57] Newark element14. (2014, 06-05-2014). *Schneider Electric TM2ALM3LT*. Available: <http://www.newark.com/schneider-electric/tm2alm3lt/analogue-i-o-module-20ma-24vdc/dp/11R1923>
- [58] Newark element14. (2014, 06-05-2014). *Schneider Electric TM2AMI2HT*. Available: <http://www.newark.com/schneider-electric/tm2ami2ht/analogue-input-module-40ma-24vdc/dp/11R1924?ost=TM2AMI2HT>
- [59] Total Temperature Instrumentation Inc. (2014, 06-05-2014). *Vaisala HMP110 Humidity and Temperature Probe*. Available: <http://www.instrumart.com/products/35386/vaisala-hmp110-humidity-and-temperature-probe>
- [60] Vaisala. (2014, 06-05-2014). *HMP110 Humidity and Temperature Probe*. Available: http://www.vaisala.com/en/industrialmeasurements/products/humidity/modules_oem/Pages/HMP110.aspx
- [61] Arduino. (2014, 06-05-2014). *Arduino Mega2560 Rev3*. Available: http://store.arduino.cc/index.php?main_page=product_info&cPath=11&products_id=196
- [62] Microchip Direct. (2014, 06-05-2014). *DM240001 - Explorer 16 Development Board (100-pin)*. Available: <http://www.microchipdirect.com/ProductSearch.aspx?Keywords=dm240001>
- [63] Earth Computer Technologies Inc. (06-05-2014). *arLCD*. Available: <http://store.earthlcd.com/arLCD>
- [64] playingwithfusion. (2014, 06-05-2014). *MAX31855 K-Type Thermocouple Breakout; MAX6675 Upgrade (3V Arduino compatible)*. Available: <http://www.ebay.co.uk/itm/MAX31855-K-Type-Thermocouple-Breakout-MAX6675-Upgrade-3V-Arduino-compatible-/331172799744?>
-

-
- [65] Microchip Direct. (2014, 07-06-2014). *MA240014 - PIC24F USB PIM*. Available:
<http://www.microchipdirect.com/ProductSearch.aspx?Keywords=MA240014>
- [66] Mouser Electronics Inc. (2014, 06-05-2014). *Microtips Technology MTF-TQ35SP811-AV*. Available:
<http://pt.mouser.com/ProductDetail/Microtips-Technology/MTF-TQ35SP811-AV/?qs=sGAEpiMZZMu%2fRY1bNe3bOz9tCrvMqwSy8Uitt5w7Ph0%3d>
- [67] Maxim Integrated. (2014, 06-05-2014). *MAX31855KASA+*. Available:
<https://shop.maximintegrated.com/storefront/priceavailable.do?Partnumber=MAX31855KASA%2B&event=PartSearch&menuitem=PriceAndAvailability>
- [68] Microchip Technology Inc. (2014, 06-05-2014). *PIC24FJ256GB110*. Available:
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en531089#pricindAndSamples>
- [69] Microchip Technology Inc., "Developing Embedded Graphics Applications using PIC® Microcontrollers with Integrated Graphics Controller," ed: Microchip Technology Inc., 2011.
- [70] Microtips Technology Inc., "Liquid Crystal Display Module MTF-TQ35SP811-AV," ed: Microtips Technology Inc., 2009.
- [71] Solomon Systech Limited, "SSD1926," ed: Solomon Systech Limited, 2007.
- [72] Hantouch USA, "How it works: 4-Wire Analog-Resistive Touch Screens," ed: Hantouch USA.
- [73] Wikipedia. (2014, 26-03-2014). *USB*. Available:
<http://en.wikipedia.org/wiki/USB>
- [74] Microchip Technology Inc., "PIC24FJ256GA110 Family Data Sheet," ed. U.S.A.: Microchip Technology Inc., 2008.
- [75] Microchip Technology Inc., "PIC24FJ256GB110 Family Data Sheet," ed. U.S.A.: Microchip Technology Inc., 2008.
- [76] Microchip Technology Inc., "Explorer 16 Development Board User's Guide," ed: Microchip Technology Inc., 2014.
- [77] ETConcept, "Display Adapt Board," ed, 2008.
- [78] Microchip Technology Inc., "PICkit™ 3 In-Circuit Debugger/Programmer User's Guide," ed: Microchip Technology Inc., 2013.
- [79] Microchip Technology Inc., "PIC24F Family Reference Manual," ed: Microchip Technology Inc., 2010.
- [80] Maxim Integrated, "MAX667 +5V/Programmable Low-Dropout Voltage Regulator," ed: Maxim Integrated, 2008.
-

-
- [81] Maxim Integrated, "MAX884 5V/3.3V or Adjustable, Low-Dropout, Low IQ, 200mA Linear Regulators," ed: Maxim Integrated, 2009.
- [82] tinxi-clothes. (2014, 28-05-2014). *eBay - 2X New Mini Female K Type Plug Thermocouple Wire Cable Connectors Plugs Yellow*. Available: http://www.ebay.com/itm/281023678863?ssPageName=STRK:MEW NX:IT&_trksid=p3984.m1439.l2649
- [83] T. Henrique. (2013, 07-03-2014). *PIC: DHT11 - Sensor de Umidade e Temperatura*. Available: <http://microcontrolandos.blogspot.pt/2013/08/pic-dht11-sensor-de-umidade-e-temperatura.html>
- [84] Microchip Technology Inc., "SPI - Overview and Use of the PICmicro Serial Peripheral Interface," ed: Microchip Technology Inc.
- [85] Microchip Technology Inc., "IEEE 754 Compliant Floating Point Routines," ed: Microchip Technology Inc., 1997.
- [86] Microchip Technology Inc., "Microchip MiWi™ Wireless Networking Protocol Stack," ed: Microchip Technology Inc., 2010.
- [87] Microchip Technology Inc., "Microchip MiWi™ PRO Wireless Networking Protocol," ed: Microchip Technology Inc., 2011.
- [88] Microchip Technology Inc., "Microchip Wireless (MiWi™) Application Programming Interface – MiApp," ed: Microchip Technology Inc., 2009.
- [89] Microchip Technology Inc., "Fast Integer Square Root," ed: Microchip Technology Inc., 2000.
- [90] Robert Smith. (2014, 22-05-2014). *Test and Calibrate DHT22 / AM2302 / RHT03*. Available: http://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/calib_dht22.html
- [91] R. Tavares, "Desenvolvimento de um dispositivo passivo para reabilitação motora de uma mão," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2014.
- [92] F. Carneiro, "Desenvolvimento de um sistema de atuação e controlo para dedo de luva de reabilitação," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2014.

Anexos

A. Sensores utilizados e suas características principais

DHT22

	Humidade	Temperatura
Gama	0 a 100%	-40 a 80 °C
Resolução	0.1 %	0.1°C
Precisão	$\pm 2\%$ (no máximo $\pm 5\%$)	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Repetibilidade	$\pm 1\%$	$\pm 0.2^\circ\text{C}$
Histerese	$\pm 0.3\%$	Sem informação
Estabilidade a longo prazo	$\pm 0.5\%$	Sem informação
Alimentação	CC: 3.3 V a 6 V	

Termopar K com MAX31855K

Resolução	0.25°C
Precisão	$\pm 2^\circ\text{C}$ (ambiente entre -20°C e $+85^\circ\text{C}$)
Gama	-270°C a 1372°C
Alimentação	CC: 3.0 V a 3.6 V

Sensor de corrente desenvolvido

Sensibilidade nominal	$2.6234 \frac{A_{RMS}}{V_{RMS}}$
Gama	0 a $2.25 A_{RMS}$ (0 a $1.75 A_{RMS}$ nesta implementação)
Resolução	$\approx 8 \text{ mA}$
Alimentação	CC: 5 V